



# Capítulo 4

## Parametrización de la severidad de los tipos de fallo para ocho plantas piloto en un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas*

Maryory Patricia Villamizar León<sup>1</sup>, Alfonso Santos Jaimes<sup>2</sup>, Juan Carlos Villamizar Rincón<sup>3</sup>, Marcela Villa Marulanda<sup>4</sup>, Omar Pinzón Ardila<sup>5</sup>, Silvia Alejandra Sotelo López<sup>6</sup>, Pedro Nel Jaimes Jaimes<sup>7</sup>, Carlos Alfonso Mejía Rivera<sup>8</sup>, Henry Yitzhak Acosta Carrascal<sup>9</sup>, Orlando José Espinosa López<sup>10</sup>, Juan Felipe Moreno Caballero<sup>11</sup>, José Luis Mojica Estrada<sup>12</sup>, Yeirleth Liliana Sánchez Cancela<sup>13</sup>, Jorge Andrés Roa Jeréz<sup>14</sup>, Rossvan Johan Plata Villamizar<sup>15</sup>, Carlos Eduardo Martínez Arias<sup>16</sup>, Héctor Julio Picón Hernández<sup>17</sup>, Carlos Andrés González Sánchez<sup>18</sup>, David de Jesús Pérez Martínez<sup>19</sup>

<sup>1</sup> Líder Técnico UPB. Correo electrónico: maryory.villamizar@upb.edu.co

<sup>2</sup> Investigador UPB. Correo electrónico: alfonso.santos@upb.edu.co

<sup>3</sup> Investigador UPB. Correo electrónico: juan.villamizar@upb.edu.co

<sup>4</sup> Investigadora UPB. Correo electrónico: marcela.villa@upb.edu.co

<sup>5</sup> Investigador UPB. Correo electrónico: omar.pinzon@upb.edu.co

<sup>6</sup> Investigadora UPB. Correo electrónico: silvia.sotelo@upb.edu.co

<sup>7</sup> Investigador UPB. Correo electrónico: pedro.jaimes@upb.edu.co

<sup>8</sup> Profesional en Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: carlosalfonsomejiaivera@gmail.com

<sup>9</sup> Profesional en Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: henryyacostac@gmail.com

<sup>10</sup> Profesional en Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: ortlandojespinos@gmail.com

<sup>11</sup> Profesional en Ingeniería Industrial, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: jf.art@hotmail.com

<sup>12</sup> Profesional en Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: mojjk72@gmail.com

<sup>13</sup> Profesional en Ingeniería Mecánica, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: lilianacancela10@gmail.com

<sup>14</sup> Profesional en Ingeniería Electrónica, Universidad Pontificia Bolivariana. Correo electrónico: jorgeroa.jerez@gmail.com

<sup>15</sup> Líder Técnico, ICP - Ecopetrol. Correo electrónico: rossvan.plata@ecopetrol.com.co

<sup>16</sup> Investigador, ICP - Ecopetrol. Correo electrónico: carlos.martinez@ecopetrol.com.co

<sup>17</sup> Investigador, ICP - Ecopetrol. Correo electrónico: hector.picon@ecopetrol.com.co

<sup>18</sup> Investigador, ICP - Ecopetrol. Correo electrónico: carlosan.gonzalez@ecopetrol.com.co

<sup>19</sup> Investigador, ICP - Ecopetrol. Correo electrónico: davidje.perez@ecopetrol.com.co



## Resumen

El propósito de la investigación es parametrizar la severidad de los tipos de fallo priorizados en los activos I+D relevantes para ocho plantas piloto (casos de estudio), a partir de la implementación de diferentes metodologías organizadas en tres fases: fase I diagnóstico MES (*Maintenance Effectiveness Survey*), fase II ACR (*Root Cause Analysis*) y fase III FMECA (*Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*). En la fase I se diagnostica el área de mantenimiento de la empresa del sector *oil & gas* a partir de la metodología MES, la cual tiene en cuenta: (i) recursos gerenciales, (ii) gerencia de la información, (iii) equipos y técnicas de mantenimiento preventivo, (iv) planificación y ejecución, (v) soporte, calidad y motivación, y finalmente, (vi) aspectos técnicos asociados a la confiabilidad. Como resultado se obtiene un 75 % de los casos de estudio en el nivel de “muy buenas prácticas de mantenimiento” y el 25 % restante “clase mundial”, sin embargo, los encuestados expresan deficiencias en ciertas preguntas de las diferentes perspectivas, para las cuales fueron propuestas acciones de mejora.

En este contexto, en la fase II se identifican los posibles tipos de fallo, escogiendo el 80 % de estos teniendo en cuenta su cálculo del riesgo total anual (RTA) para aplicarles el análisis de causa raíz (ACR). Las plantas piloto son asumidas como un único activo para la empresa y, por ende, para la aplicación del ACR. De los once ACR realizados, se llega en un 100 % a nivel de causa raíz, siendo todas estas clasificadas como causa raíz latente. Finalmente, en la fase III, se lleva a cabo la parametrización de la severidad de los tipos de fallo priorizados, utilizando un formato de la empresa asociado a la valoración del riesgo, el cual contempla los escenarios de: (i) fuego, (ii) explosión y (iii) toxicidad. Adicionalmente, se emplea el formato matriz valoración de riesgos (RAM) para la valoración del riesgo al efecto asociado, estos son registrados en los análisis de modos, efectos y criticidad de fallo (AMFEC o FMECA) actualizado a partir de la comparación del formato AMFE de la empresa frente a la norma española UNE-EN-60812, recomendando la modificación de dos columnas, mantener tres, eliminar siete e incluir seis columnas dentro del formato.

**Palabras clave:** mantenimiento, SIX SIGMA, petróleo y gas, activos I+D.

## 4.1 Introducción

Todo tiene un inicio y un fin. Los activos presentan un ciclo de vida que define dichos tiempos. Este fin se puede extender a partir de la implementación de estrategias de mantenimiento idóneas. La práctica del mantenimiento ha ido evolucionando con el hombre al pasar del tiempo. En sus inicios se realizaba de manera involuntaria y acarreada por la necesidad de reparar los utensilios de caza y sobrevivencia al rededor del mundo (120.000 a. C.).

Hacia 1780 fue tomando importancia en el ámbito académico y práctico y adquirió la denominación de mantenimiento correctivo, de acuerdo con su nombre, hace alusión al arreglo del objeto que se realizaba en la ocasión en que el objeto fallara [1].

En 1914, los países beligerantes dieron luz a un nuevo concepto: mantenimiento preventivo [1], cuya "finalidad es encontrar y corregir los problemas menores antes de que estos provoquen fallos" [2]. Luego, comenzaron a implementar modelos de control estadísticos de calidad (SQC) en 1946, los cuales hacen referencia a la aplicación de métodos estadísticos para monitorear, evaluar los sistemas y determinar si un cambio clave en una variable de los ajustes es apropiado [1].

A partir de la década de 1950, con la reconstrucción de la industria después de la guerra, en particular la de Japón y Alemania, se desarrolló un mercado mucho más competitivo. Se hace más evidente una creciente intolerancia al tiempo de inactividad. El costo de la mano de obra se hizo cada vez más importante, llevando esto a una mecanización y automatización cada vez mayor. La maquinaria era de construcción ligera y funcionaba a velocidades más altas. Se desgastaban más rápidamente y fueron vistas como menos confiables. La producción demandó un mejor mantenimiento que condujo al desarrollo del mantenimiento preventivo planificado [3].

Entre los años de 1960 y 1970, en Estados Unidos, gracias a la industria automotriz, se dieron a conocer métodos y técnicas innova-

doras de la materia en cuestión, tales como el análisis de modos de fallos y sus efectos (FMEA), mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM), análisis de causa raíz (ACR, en 1965) y los sistemas computarizados para la administración de mantenimiento (CMMS). Esto debido a dos puntos en particular [1]: (i) comienza a percibirse el mantenimiento como calidad de proceso, valor agregado, y no solo como algo presente imperativo, brindando mayor eficiencia; y, (ii) la época de la computación que trajo consigo un modo eficiente en la recolección y almacenamiento de datos para su posterior análisis, ya que "una de las razones dominantes del mantenimiento ineficiente es la falta de datos para cuantificar la necesidad real de reparación o conservación de maquinaria, equipo y sistemas de una planta" [4].

El ACR se destaca como uno de los métodos más empleados hasta el día de hoy, entre sus técnicas incluye: el análisis de barrera, eventos y factores causales, diagramas de árbol y el diagrama de causa y efecto. Estas son muy útiles en la identificación de causas básicas para que los esfuerzos sean del máximo [5]. Igualmente, el FMEA, un análisis de abajo hacia arriba, que parte de los componentes y su forma de fracaso con el fin de analizar, en el extremo de la cadena, los efectos sobre las funciones del sistema, de tal manera que se permitan la prevención y limitación de los fenómenos de propagación de las fallos [6], así mismo, es útil para el análisis los diversos mecanismos de mitigación de los modos de fallo, para la determinación de los requisitos de operacionales y de mantenimiento, y en el desarrollo de manuales de mantenimiento [7].

Complementando las técnicas principales, nacen otras que ayudan al proceso de mantenimiento en cuestión de toma de decisiones complejas. Debido a las limitaciones en los recursos, tanto económicas como de tiempo, es menester determinar en qué objeto se van a distribuir dichos recursos. Es por tal motivo que los procesos cuantitativos aplicados a la toma de decisiones, donde intervienen más de una variable, se ven implementados en una vasta variedad de situaciones, ya que ofrecen una gama de posibles soluciones óptimas ponderadas a partir de criterios establecidos y valorados por expertos, lo que elimina su subjetividad. Una de las aplicaciones

más importantes es la priorización, con la que se determina el mérito relativo de un conjunto de alternativas [8].

El área de mantenimiento no siempre es considerada primordial dentro de algunas organizaciones, por lo cual no se involucra en la toma de decisiones estratégicas. Sin embargo, en cuestión del costo total, el mantenimiento representa uno de los mayores rubros de la operación en muchas industrias [4]. Por ejemplo, para una empresa del sector *oil & gas* los costos fijos de mantenimiento representan el mayor rubro, con un 20 % de los balances de costos de ventas [9].

El objetivo del mantenimiento es asegurar que todo activo físico cumpla con las funciones deseadas, favoreciendo la competitividad de las empresas a través de la eficiencia, la productividad y el control de costos, que se adquieren en su correcta aplicación [10]. El mantenimiento correctivo es entre 60 % y 70 % menos eficiente que uno preventivo o predictivo [11]. Por tal razón, la implementación de un sistema de mantenimiento preventivo adecuado en las empresas puede lograr mayores rendimientos y una reducción en los costos gracias a un aumento de entre el 10 % y 20 % de la productividad [12], obteniendo una mejora en el rendimiento del mantenimiento [13].

Colombia no está exenta de estos avances en materia de mantenimiento y aplica diversidad de métodos y técnicas idóneas de acuerdo con la industria en particular a tratar, así, se ha relacionado una evolución positiva del mantenimiento en diferentes temas particulares como lo son la gestión, costos y formación. De hecho, estos tres temas fueron el pilar de la investigación realizada en el 2007 por el capítulo Cundinamarca de la Asociación Colombiana de Ingenieros [14].

La asociación realizó un *Diagnóstico del mantenimiento en Colombia* en el año 2015, el cual se enfocó en determinar el estado actual del sector en el país y su tendencia en los últimos años. En los resultados emitidos del XVIII Congreso Internacional de Mantenimiento y Gestión de Activos, el Ingeniero Ismael Arenas, presidente de ACIEM, comentó que "en ACIEM consideramos que el sector de mantenimiento ha evolucionado de una forma positiva haciendo un tránsito hacia la gestión de activos, sin embargo el estudio permitió

identificar aspectos que deben ser mejorados, como la ausencia de mantenimiento predictivo" [15]. Lo que evidencia una línea de continuo cambio dirigido a mejorar los procesos y al cumplimiento de las normas en el área, apoyada en una variedad de metodologías y procesos. Finalmente, en industrias de gran tamaño, de alto impacto económico para el país como lo es la generación de energía, presenta una mayor inversión y asistencia del tema.

Ecopetrol, a través de los años, ha llevado a cabo investigaciones en el tema. Algunos casos específicos son: Análisis de Modos y Efectos de Fallos (FMEA) para la optimización de la estrategia en el mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica de la refinería de Cartagena mediante el uso de herramientas de confiabilidad en el 2007 [16], y a su vez un modelo de gestión de mantenimiento para la planta de inyección de agua Campo Tello, basado en estudios de confiabilidad mediante la aplicación de metodologías, entre esas RCFA (*Root Cause Failure Analysis*) y FMEA en el 2008 [17].

Se evidencia, entonces, que es una empresa que se mantiene actualizada en sus proyectos de mantenimiento y demuestra la importancia de la investigación a realizar para obtener una mayor eficiencia a través del mantenimiento idóneo, y aumentar la rentabilidad. Sin embargo, a la fecha, no se había llevado a cabo una investigación en gestión de las estrategias de mantenimiento en activos de I+D dentro de un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas*, lo que señala la importancia del proyecto de investigación.

Se ha analizado ampliamente el rendimiento del mantenimiento en el área de producción, sin embargo, para un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas* se requiere de un análisis detallado debido a la diferencia de contexto operacional: producción e investigación. Por tal motivo, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿cuál es el nivel de impacto de los tipos de fallos de los equipos relevantes, en cada una de las plantas piloto y en los laboratorios para un centro de innovación y tecnología del sector *oil & gas*?

Los planes de mantenimiento se diseñan de acuerdo con las características propias de las industrias y de los equipos, con la fi-

nalidad de maximizar su disponibilidad y minimizar los costos. En esta investigación se desarrolló un plan de trabajo organizado en cuatro fases que integran las siguientes técnicas: el MES (*Maintenance Effectiveness Survey*) para caracterizar la situación actual del área en dicho centro de innovación; análisis de causa raíz – ACR (*Root Cause Analysis*), para determinar las causas y efectos de los fallos más representativos de dichos equipos priorizados; y análisis de modos, efectos y criticidad de fallo –FMECA (*Failure Mode Effect and Criticality Analysis*), para prevenir incidentes de seguridad y reducir su incidencia.

El objetivo de la investigación es parametrizar la severidad de los tipos de fallo relevantes a los equipos priorizados de I+D para una muestra representativa de un centro de innovación del sector *oil & gas*. Este documento se encuentra distribuido en cinco secciones, en la sección primera se trabajará la introducción, en la segunda sección se presenta la revisión de literatura, la sección tercera expone la metodología, en la sección cuarta se presentan los resultados, la sección quinta desarrolla la discusión de los resultados y expone las conclusiones.

## 4.2 Revisión de literatura

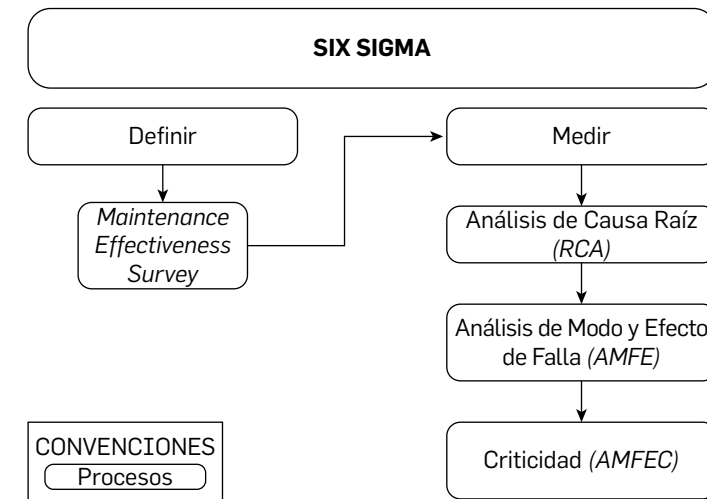
### 4.2.1 Conceptos, teorías o enfoques

La relación de estructura teórica utilizada en este trabajo se muestra en la figura 4.1 comenzando con la metodología Six Sigma, se explican sus dos primeras fases: definir y medir; la evaluación del área de mantenimiento: *Maintenance Effectiveness Survey* (MES); el análisis de causa raíz (ACR); y el análisis de modos efectos y criticidad de la falla (AMFEC).

#### 4.2.1.1 Metodología SIX SIGMA

La metodología SIX SIGMA es un “sistema estructurado de herramientas y técnicas de gestión de la calidad total aplicada a procesos, productos y servicios” [18]. Esta metodología integra herramientas

Figura 4.1. Diagrama de relación de la estructura teórica utilizada



asociadas a la gestión de la calidad, se establecen metas de corto plazo que permitan conseguir objetivos a largo plazo. Estos objetivos a largo plazo se centran en el establecimiento de procesos más robustos, donde los defectos alcanzados son unos pocos por millón de oportunidades [19].

La metodología SIX SIGMA, representa un proceso que es “99.99966 % bueno”; lo que significa, por ejemplo: siete artículos perdidos por hora entre 20.000 en el envío de paquetes; no contar con agua potable durante un minuto cada siete meses; realizar 1,7 operaciones quirúrgicas incorrectas por semana por 5.000 procedimientos o el realizar un aterrizaje corto o largo cada cinco años en los grandes aeropuertos del mundo [20]. Para lograr esto, SIX SIGMA trabaja cinco fases: definir, medir, analizar, mejorar y controlar. En esta investigación se cubren dos fases: definir y medir.

La primera fase del proceso, *definir*, tiene como objetivo establecer la causa de un problema, acotar sus límites: dónde empezar y dónde parar el proceso. Lo anterior proporciona perspicacia respecto a la concentración de los esfuerzos de mejora [21].

El objetivo de la fase *medir* es la recolección de datos de los componentes del sistema que se desea analizar, que busca identificar las relaciones existentes y a partir de estas, definir las metas. Además, "Una vez un negocio sabe dónde está y dónde quiere llegar, las brechas existentes pueden determinarse, así como los esfuerzos y los recursos necesarios para reducirlas y alcanzar las metas" [21]. Dentro de las herramientas propuestas, se destaca el análisis de modo de fallo y sus efectos AMFE o AMFEC que añade la criticidad [21]. En [7] se presenta el AMFEC como uno de los métodos más efectivos en los análisis de confiabilidad aplicados a SIX SIGMA. Teniendo en cuenta que el AMFEC trabaja a partir de la definición de los modos de fallo, una técnica apropiada para su identificación es el análisis de causa raíz (ACR).

#### 4.2.1.2 Técnica de diagnóstico MES (Maintenance Effectiveness Survey)

El objetivo de la encuesta MES es identificar las fortalezas y debilidades de la gestión de mantenimiento para así identificar las oportunidades y corregir errores. Esta acción proporciona una visión de la estructura, las relaciones, los procesos y las personas relacionadas a las prácticas de un buen mantenimiento. Este es el primer paso en un proceso de mejoramiento del área de mantenimiento [22]

En la aplicación, se recomienda asegurar que las personas que las realizan tengan pleno conocimiento de que se hace de esta manera para proteger sus identidades, así que se recomienda guardar las encuestas en un sobre debidamente rotulado con el título *Encuestas de mantenimiento*, entregarlas a las personas y poner una caja donde estas deben ser devueltas. El tiempo estimado para desarrollar una encuesta de este tipo es de unos 20 a 30 minutos [24].

La técnica de diagnóstico MES (*Maintenance Effectiveness Survey*) se fundamenta en un cuestionario en el que se evalúan 60 preguntas distribuidas en cinco áreas del mantenimiento. Las áreas de mantenimiento evaluadas son: (i) recursos gerenciales, (ii) gerencia de la información, (iii) equipos y técnicas de mantenimiento preventivo, (iv) planificación y ejecución y (v) soporte-calidad-motivación [23].

El proceso de cuantificación de las áreas a diagnosticar se lleva a cabo de la siguiente manera: los colaboradores seleccionados evalúan las doce preguntas elaboradas por cada área (total 5 áreas/60 preguntas) graduándose en una escala de 1 a 5 [23] así: 1 = Muy deficiente, 2 = Deficiente, 3 = Regular, 4 = Bueno y 5 = Excelente.

Finalmente, dichas puntuaciones se suman y se promedian entre el número total de las personas encuestadas. Clasificando la categoría del área de mantenimiento en función de los siguientes rangos [23]:

- 300-261: categoría "Clase Mundial" /nivel de excelencia en mantenimiento
- 201-260: categoría "Muy buena" /nivel de buenas prácticas en mantenimiento
- 141-200: categoría "Por arriba del nivel promedio" /nivel aceptable en mantenimiento
- 81-140: categoría "Por debajo del promedio" /nivel no muy bueno en mantenimiento, con oportunidades para mejorar
- Menos de 80: categoría "Muy por debajo del promedio" /nivel muy malo mantenimiento con muchas oportunidades para mejorar.

#### 4.2.1.3. Análisis de causa raíz (ACR)

En la década de los setenta surge en la industria mundial la necesidad de hacer los sistemas productivos más confiables. Para lograr esto, se empezaron a implementar herramientas con el fin de analizar las causas que generaban obstrucción en los sistemas, fallas que provocaban un funcionamiento erróneo tanto en las tareas establecidas inicialmente para un procedimiento, como también en el rendimiento de las habilidades humanas. Estas técnicas tuvieron gran acogida en la industria nuclear y en la aviación en las cuales, luego de varios años de investigaciones y pruebas, se desarrolla la técnica análisis causa raíz (ACR), la cual presenta sus primeros estudios en la psicología industrial y el estudio de los factores humanos, acercándose al análisis del error de una manera retrospectiva [25].



Por otro lado, el Departamento de Energía de los Estados Unidos en el documento *Root Cause Analysis Guidance Document* de 1992, define el ACR como "La investigación y reporte de las causas de ocurrencias para permitir la identificación de acciones correctivas adecuadas para prevenir la recurrencia y, por lo tanto, proteger la salud y la seguridad del público, los trabajadores y el medio ambiente" [26]. Vorley y Tickle, QM&T, 2002, por su parte, la definen como "una metodología objetiva, minuciosa y disciplinada empleada para determinar las causas subyacentes más probables de problemas, quejas y eventos no deseados dentro de una organización, con el objetivo de formular y acordar acciones correctivas para, al menos, mitigar, si no eliminar, esas causas y así producir una mejora significativa del rendimiento a largo plazo" [27].

De esta manera, el propósito de la técnica ACR consiste en determinar el origen, la frecuencia y el impacto de la falla sobre el ambiente, la seguridad y las operaciones, mediante un proceso de análisis secuencial cualitativo. Para aplicar esta técnica se requiere de una revisión detallada de todos los elementos implicados en las fallas, tales como: personas, equipos, procedimientos, entornos, entre otros factores. Los resultados del ACR permiten plantear estrategias encaminadas a mejorar la confiabilidad de los sistemas, a través de soluciones efectivas para todos los posibles modos de fallo [25], [28].

Para la aplicación del ACR [29], se determinan cuatro pasos generales.

- **Recolección de datos.** El primer paso para realizar el análisis es obtener información. Sin datos completos y un buen entendimiento del evento, los factores causales y las causas raíces del acontecimiento no podrán ser detectadas. La recolección de datos es lo que más lleva tiempo en el análisis de un evento.
- **Aplicación de método o herramienta ACR.** Es aquí donde se organiza y analiza la información obtenida en la etapa anterior y se identifican brechas y deficiencia en el conocimiento a medida que avanza la investigación. Cuando la ocurrencia ha sido totalmente analizada, los investigadores se encuentran en una buena posición para determinar cuáles fueron los mayores contribuido-

res en el incidente, llamados también factores causales. Los factores causales son aquellos fallos humanos o fallos de equipos que, si fueran eliminados, prevendrían la incidencia o reducirían su severidad.

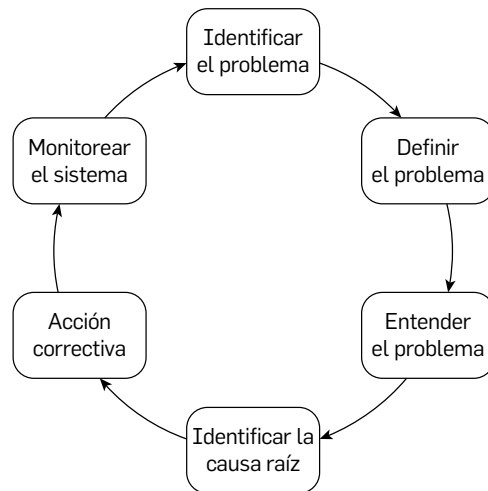
- **Identificación de la causa raíz.** Como consecuencia, al detectar todos los factores causales, los investigadores comienzan con la detección de la causa raíz. La pregunta que se deben hacer los investigadores es por qué factores causales particulares existieron u ocurrieron. La identificación de las causas raíz ayuda al investigador a determinar las razones por las que ocurrió el evento, de manera que los problemas que rodean la ocurrencia pueden ser abordados.
- **Generación de recomendaciones e implementación.** Se deben generar recomendaciones alcanzables en un tiempo estipulado, teniendo en cuenta la identificación de las causas raíz para los determinados factores causales, y de esta forma prevenir su recurrencia. El analista de la causa raíz no es normalmente responsable de la implementación de las recomendaciones generadas en el análisis. Sin embargo, el no implementar las recomendaciones convierte al esfuerzo utilizado para realizar el análisis de causa raíz en una pérdida, tanto económica como de tiempo [29].

La figura 4.2 (página 262) muestra el ciclo del ACR con los pasos anteriormente mencionados.

La aplicación del ACR requiere de una serie de técnicas que producen una aproximación sistemática, cuantificada y documentada para la identificación, entendimiento y resolución de causas ocultas [30]. Entre estas, destacan las siguientes:

- **Herramienta ACR: diagrama de espina de pescado (Ishikawa)**  
Este método se utiliza para ordenar gráficamente posibles causas raíz en grupos lógicos [31]. El resultado se muestra al final de una línea horizontal (la "cabeza" del "pez"), y las ramas que conducen desde esta línea identifican la categoría de nivel más alto. Las categorías usadas son:

Figura 4.2. Pasos del ACR de forma cíclica



Fuente: Mini guide to root cause analysis [30].

- Madre naturaleza (entorno, entorno)
- Material (elementos físicos, requisitos, normas)
- Hombre (personas, habilidades, gestión)
- Medición (métricas, datos)
- Métodos (proceso, procedimientos, sistemas)
- Máquina (equipo, tecnología)

- **Herramienta ACR: método de los cinco porqués**

Es un proceso basado en el equipo similar al de lluvia de ideas, diseñado para investigar progresivamente las causas de nivel inferior de cada causa potencial. La herramienta permite llegar a la causa raíz de un problema con bastante rapidez por hacer repetidamente la pregunta: ¿por qué? Cinco es una propuesta general, ya que se puede llegar a necesitar más o menos. El uso de la herramienta es relativamente simple [31]:

- Primero, identifique el enunciado del problema.
- Luego, pregunte por qué ocurrió el problema (incluya múltiples razones potenciales, si es posible).
- Continúe preguntando, ¿por qué? por cada razón potencial hasta que las respuestas se identifiquen como causas raíz accionables (detenga el ejercicio cuando las respuestas se vuelvan como la gravedad, el frío en Alaska, etc.).
- Excluir sistemáticamente elementos basados en pruebas objetivas (como resultados de pruebas, etc.) hasta que las causas raíz procesables estén aisladas.

Las posibles causas deberán ser verificadas, si realmente son una causa al problema anterior [31].

- **Herramienta ACR: Pareto analysis**

En [32] se expone un enfoque estadístico para la resolución de problemas que utiliza una base de datos con inconvenientes que permiten identificar el número de factores causales predefinidos que han ocurrido en su negocio o sistema. Se basa en el principio de Pareto, también conocido como la regla 80-20, que supone que el 80 % de sus problemas son causados por el 20 % de las causas. Se pretende dirigir los recursos hacia las causas más comunes. A menudo mal utilizado como un método ACR, sin embargo, el análisis de Pareto se utiliza mejor como una herramienta para determinar dónde iniciar el análisis.

- **Definición de causa raíz: física, humana o latente**

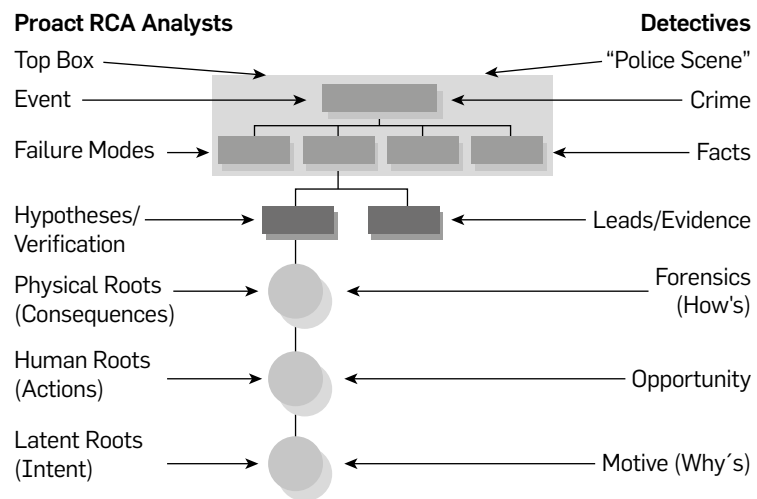
Según [33] una vez se definen las posibles causas raíz, se procede a identificar y clasificar las causas en tres categorías. En [34] se muestra un diagrama lógico (ver figura 4.3, página 264) entre las similitudes de un proceso ACR y una investigación criminal, el cual incluye: el evento primario, los modos de fallo presentados, las hipótesis planteadas, junto con la definición de tres categorías de causa raíz: física, humana y latente.

- **Definición de causa raíz física**

La causa raíz física es la primera categoría que se encuentra a través del proceso. Estas causas son observables, tangibles y



Figura 4.3. Diagrama lógico similitudes entre un ACR y una investigación criminal



Fuente: [34].

se encuentran al nivel de componente. Las causas raíz físicas generalmente son identificables en el árbol lógico dado que son las primeras consecuencias perceptibles después de alcanzado un error por decisión humana. Es importante anotar que existe una tendencia por parte del analista a la hora de usar métodos de resolución de problemas a detenerse en este nivel, llamando dichas causas como causas raíz.

#### • Definición de causa raíz humana

Las causas raíz humanas casi siempre desencadenarán una causa raíz física. Las causas de origen humano son errores de decisión. Estos son errores de omisión o comisión. Esto significa que, o decidimos no hacer algo que deberíamos haber hecho, o hicimos algo que se suponía que no deberíamos hacer. Terminar un análisis con una conclusión de *error humano* es una salida errónea. Por esa razón, se utiliza la raíz humana solo para representar una decisión humana que desencadenó una serie de consecuencias físicas. Simplemente decir *error humano* no describe lo que realmente sucedió para comprender el marco de referencia sobre el comportamiento

de las personas y juzgar si tiene algún sentido, así que es necesario tener en cuenta el contexto de trabajo.

El autor propone los diez principales contribuyentes de errores humanos:

1. Supervisión ineficaz
2. Falta de sistema de rendición de cuentas
3. Entorno distraído
  - Baja alerta
  - Complacencia
4. Tensión de trabajo/presión de tiempo
5. Exceso de confianza
6. Gestión de tareas por primera vez
7. Comunicaciones imprecisas
8. Orientación vaga o incorrecta
9. Deficiencias de entrenamiento
10. Nueva tecnología

Según [34] "El comprender las condiciones que incrementan el riesgo de error humano en la toma de decisiones, permite implementar cambios proactivos para reducir el riesgo". Cuando se llega a este nivel, no se está interesado en quién lo hizo, sino por el contrario por qué se tomó la decisión en ese momento. Comprender el razonamiento detrás de las decisiones que resultan en un error es fundamental para conducir un ACR apropiado.

Cuando no se puede determinar el porqué, las personas toman una decisión, las causas no se pueden determinar, el problema no se puede resolver de forma permanente. Por lo tanto, no se puede eliminar su riesgo de recurrencia.

#### • Definición de causa raíz latente

Las causas latentes son los sistemas organizacionales (reglas o leyes) que las personas utilizan para tomar decisiones. Cuando dicho sistema tiene fallos, resulta en errores de decisión. El término "Latente" se define como: "Las consecuencias adversas que pueden permanecer inactivas dentro del sistema por un lar-

go tiempo, las cuales solo se vuelven evidentes cuando se combinan con otros factores que violan las defensas del sistema" [34].

Estos sistemas se ponen en marcha para ayudar a las personas a tomar mejores decisiones. Cuando un sistema es inadecuado u obsoleto, la gente termina cometiendo errores de decisión basados en información defectuosa. Estas son las verdaderas causas de los eventos indeseables.

#### 4.2.1.4 Análisis de los modos de fallo y sus efectos (AMFE)

El AMFE se define en [35] cómo una técnica para identificar los peligros asociados con el equipo de una planta de proceso. En [6] se trata el AMFE como un análisis de abajo hacia arriba, que parte de los componentes y su forma de fracaso con el fin de analizar, en el extremo de la cadena, los efectos sobre las funciones del sistema, que permita la prevención y limitación de los fenómenos de propagación de los fallos.

Para [13] el AMFE es un análisis sistemático de los modos de fallos potenciales para prevenirlos, del cual se pueden identificar cuatro tipos de AMFE para: sistema, diseño, proceso y servicio. (i) Sistema AMFE se centra en las funciones del sistema global; (ii) AMFE de diseño se centra en los componentes y subsistemas; (iii) proceso AMFE se centra en la fabricación y procesos de montaje y (iv) AMFE de servicio se centra en funciones de servicio. Todo proceso tiene un propósito, de hecho en [13] los objetivos de la metodología son: (i) identificar y reconocer posibles fallos incluyendo sus causas y efectos, (ii) evaluar y priorizar los modos de fallo identificados ya que los fracasos no son iguales e (iii) identificar y sugerir acciones que puedan eliminar o reducir las posibilidades de los fallos que se produzcan. Así mismo, el proceso consta de cinco pasos lógicos: (i) seleccionar un proceso de alto riesgo. (ii) revisar el proceso: este paso implica seleccionar cuidadosamente un equipo de personas con diversas responsabilidades de trabajo y niveles de experiencias, (iii) ideas sobre posibles modos de fallo, (iv) identificar las causas de los modos de fallo y (v) lista de posibles efectos de cada modo de fallo.

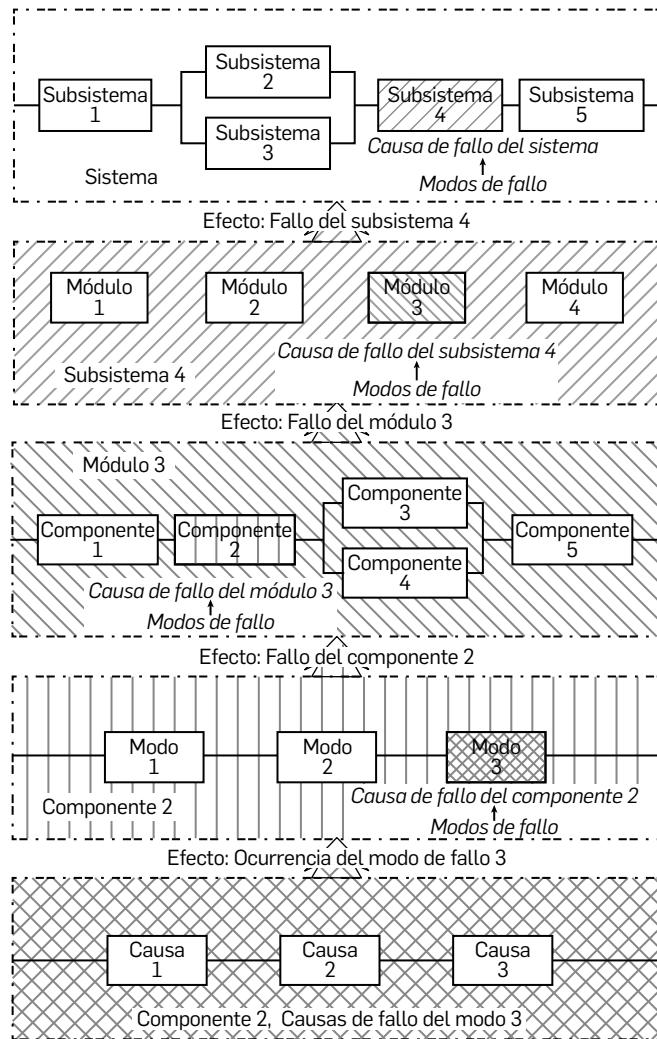
En este contexto, [13] resalta cinco beneficios de la realización de AMFE: (i) aumento de la satisfacción del cliente mejorando la seguridad y fiabilidad y mitigar el efecto adverso de los problemas antes de que lleguen al cliente, (ii) mejorar la eficiencia del desarrollo en términos de tiempo y costo por problemas de fiabilidad y fabricación durante las etapas de diseño, (iii) documentar, priorizar y comunicar riesgos haciendo temas explícitos a los clientes, administración y miembros del equipo de AMFE, (iv) ayudar a reducir las posibilidades de fracaso catastrófico que puede resultar en lesiones o efectos adversos sobre el medio ambiente y (v) optimizar esfuerzos de mantenimiento proponiendo tareas de mantenimiento preventivo aplicable y eficaz para los modos potenciales de fallo. Existen normativas internacionales que permiten estandarizar el proceso, como es el caso de la Normativa Española UNE-EN-60812, que se presenta a continuación.

#### **Definición del procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE) bajo la Normativa Española UNE-EN-60812**

La teoría sobre el análisis de modos de falla y sus efectos (AMFE) conforme la norma española UNE-EN 60812 [36] que se deriva de la norma europea EN 60812:2006, que a su vez adopta la norma internacional IEC 60812:2006. Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 200 sobre las normas básicas eléctricas cuya Secretaría desempeña la Asociación Española de Normalización y Certificación. Según la norma se define el análisis de los modos de fallo y sus efectos (AMFE) como un "procedimiento sistemático de análisis de un sistema para identificar los modos de fallo potenciales, sus causas y sus efectos en el funcionamiento del sistema". Para iniciar el análisis, el sistema debe estar lo suficientemente definido como para ser representado con un diagrama funcional de bloques en el que pueda definirse el funcionamiento de cada uno de sus elementos. "El análisis inicia con los elementos de más bajo nivel. Un efecto de un modo de fallo en un nivel inferior puede convertirse en causa de fallo de un modo de fallo de un elemento de nivel superior. El análisis se realiza de abajo hacia arriba hasta identificar el efecto

final del sistema". Un ejemplo de diagrama de bloques dado por la norma es el que se muestra en la figura 4.4.

Figura 4.4. Relación entre los modos de fallo y sus efectos en una jerarquía de sistema



Fuente: Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas, procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE). UNE-EN 60812, Comité técnico AEN/CTN 200 Normas básicas Eléctricas, AENOR.

Es de resaltar que la norma indica que un AMFE minucioso debe ser realizado por un equipo compuesto por diferentes expertos que puedan detectar la magnitud y las consecuencias de los diferentes tipos de deficiencia potenciales.

### Objetivos del AMFE

Los objetivos del AMFE dados por la norma son los siguientes:

- Identificación y evaluación completas de todos los efectos no deseados dentro de los límites definidos del sistema a analizar y la secuencia de sucesos ocasionados por cada uno de los modos de fallo del elemento en los distintos niveles de la jerarquía funcional del sistema, cualquiera que sea su causa.
- Determinación de la criticidad o la prioridad para considerar o atenuar cada modo de fallo respecto al correcto funcionamiento del sistema y su impacto sobre el proceso afectado.
- Clasificación de los modos de fallo identificados según las características pertinentes, incluyendo su facilidad de detección, su capacidad para el diagnóstico, la capacidad de prueba, medidas de compensación y operación (reparación, mantenimiento, logística, etc.).
- Identificación de fallos funcionales del sistema y la estimación de medidas de su severidad y de probabilidad de fallo.
- Desarrollo de un plan de mejora del diseño para atenuar los modos de fallo.
- Apoyar el desarrollo de un plan de mantenimiento eficaz para atenuar o reducir la probabilidad de fallo.

### Aplicación del AMFE

Para la aplicación del análisis, la norma plantea los siguientes ítems y, finalmente, resume lo descrito a continuación en el diagrama de flujo de la figura 4.5 (página 271).

### Consideraciones generales

“El análisis se realiza normalmente identificando los modos de fallo, sus respectivas causas y los efectos inmediatos y finales. Los resultados analíticos pueden presentarse en una hoja de trabajo que contenga un núcleo de información esencial para el sistema completo

y los detalles desarrollados para ese sistema específico. El análisis muestra las formas que el sistema podría fallar potencialmente, los componentes y sus modos de fallo, que podrían ser causa del fallo del sistema y las causas de ocurrencia de cada modo de fallo individual" [36].

**Causas de fallo**

"Deberían identificarse y describirse las causas más probables de fallo para cada modo de fallo potencial. No es siempre necesario identificar y describir las causas de fallo para todos los modos de fallo". "La identificación y descripción de las causas de fallo, así como las sugerencias para su mitigación deberían basarse en los efectos de los fallos y en su severidad" [36].

**Efectos de los fallos**

Es necesario identificar, evaluar y registrar las consecuencias de cada modo de fallo en el funcionamiento, función, o estado del elemento del sistema. Un efecto de fallo puede también influir en el un nivel superior y finalmente en el más alto nivel. Por consiguiente, en cada nivel debería evaluarse el efecto de los fallos que se traduce en el nivel superior.

**Métodos de detección**

"El analista debería determinar, para cada modo de fallo, la forma en la que se detecta el fallo y los medios por los que el usuario o el técnico de mantenimiento son conscientes del mismo" [36].

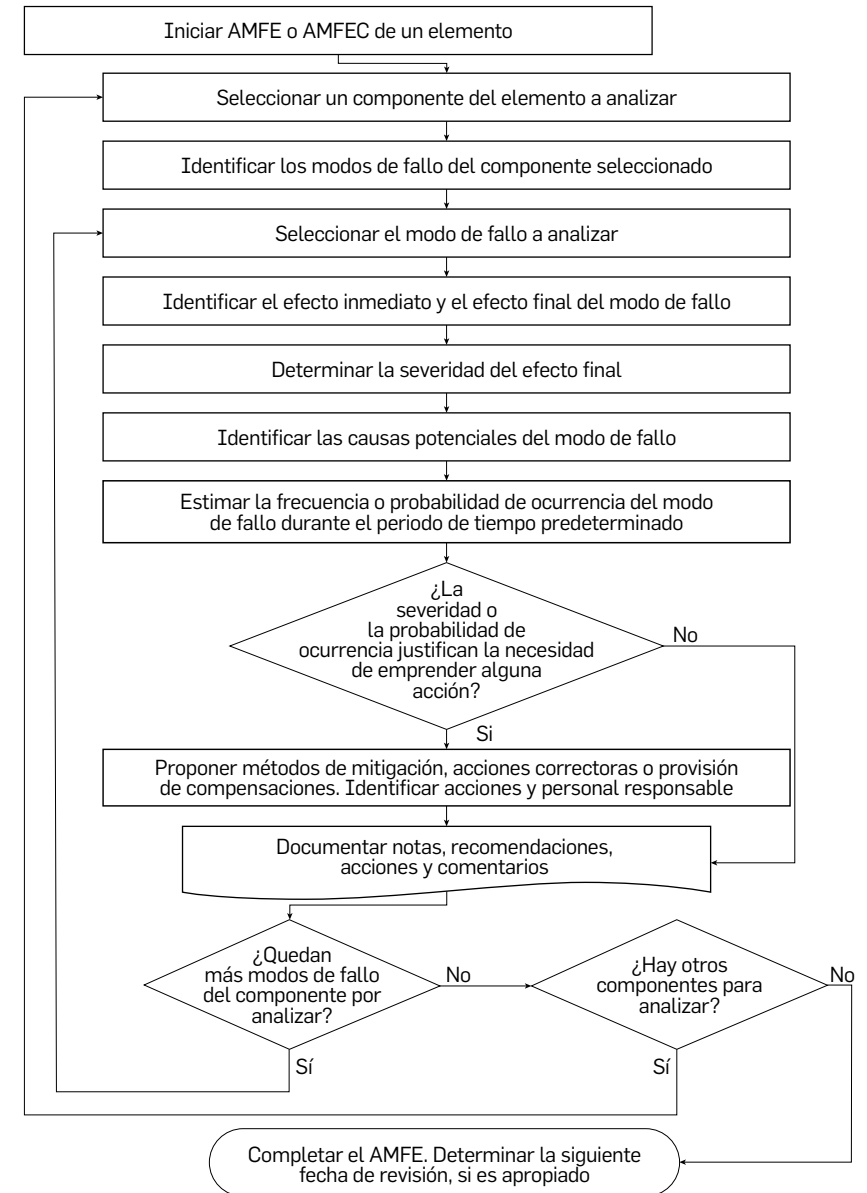
**Medidas para compensar los fallos**

Se recomienda registrar en el AMFE otras medidas como: elementos redundantes que permitan la continuidad del funcionamiento si uno o más elementos fallan, medios alternativos de funcionamiento, dispositivos de supervisión o alarma, cualquier otro medio que permita el funcionamiento eficaz o limite el daño.

**Clasificación de la severidad**

La severidad es una valoración de la importancia del efecto del modo de fallo en el funcionamiento del elemento. Un ejemplo de clasificación de severidad se observa en la tabla 4.1.

Figura 4.5. Diagrama de flujo del análisis



Fuente: Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas, procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE). UNE-EN 60812, Comité técnico AEN/CTN 200 Normas básicas Eléctricas, AENOR.

Tabla 4.1. Ejemplo ilustrativo de clasificación de severidad para efectos finales

Clase	Nivel de severidad	Consecuencias a personas o ambiente
IV	Catastrófico	Modo de fallo que potencialmente podría producir el fallo de las funciones principales del sistema y, por consiguiente, causar serios daños al mismo y su ambiente o dañar al personal.
III	Crítico	Modo de fallo que potencialmente podría producir el fallo de las funciones principales del sistema y por consiguiente causar considerables daños al mismo y su ambiente, pero que no constituye una amenaza seria de daño o para la vida del personal.
II	Marginal	Modo de fallo que potencialmente podría degradar la funcionalidad del sistema sin dañarlo de forma apreciable o sin amenazar la integridad y la vida del personal.
I	Insignificante	Modo de fallo que potencialmente podría degradar las funciones del sistema, pero que no causaría daño al mismo y no constituye una amenaza para la integridad y la vida del personal

**Fuente:** Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas, Procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE). UNE-EN 60812, Comité técnico AEN/CTN 200 Normas básicas Eléctricas, AENOR.

#### 4.2.1.5 Análisis de modos, efectos y criticidad del fallo (AMFEC)

Según [7] el acrónimo AMFE puede dividirse en dos AMFE y un CA: análisis de efectos de modo de fallo (AMFE) y de criticidad (CA). El AMFE es un análisis cualitativo de los modos de fallo mientras que la criticidad (CA) es un análisis cuantitativo del riesgo. Ahora bien, el propósito del análisis de criticidad (CA) por [7] consiste en clasificar cada modo de fallo potencial que se ha identificado en el AMFE, según la influencia combinada de la clasificación de severidad y su probabilidad de ocurrencia basada en los mejores datos disponibles.

El nivel de criticidad de los fallos se puede determinar a partir de diferentes propuestas. Estas pueden ser mediante un proceso estandarizado de la empresa particular, o bajo una metodología propuesta por algún otro autor encontrada mediante una revisión de literatura. En este contexto, según [21] el AMFE puede llegar a apli-

carse e incluir la valoración de la severidad de los efectos de fallo y su probabilidad de ocurrencia. Dicho análisis se denomina AMFEC (análisis de modos, efectos y criticidad del fallo). Para [21] el AMFEC es “un método que mira hacia el futuro y determina dónde pueden localizarse los fallos potenciales”. En [35] se propone para el nivel de criticidad, una serie de metodologías para el análisis de riesgo, las cuales se exponen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2. Metodologías para el análisis del riesgo

FASE DEL PROYECTO	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS	RESULTADOS ESPERADOS
INGENIERÍA CONCEPTUAL	<p><i>HAZID - Hazard Identification</i> (Identificación de peligros)</p> <p><i>CHECKLIST</i> (Lista de chequeo)</p> <p><i>WHAT IF</i> (¿Qué pasa si?)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientación para el proceso de selección.</li> <li>• Detectar peligros de proceso inaceptables.</li> <li>• Ayudar para el diseño del proceso.</li> <li>• Identificar las modificaciones clave del proceso que reducen el nivel de riesgo.</li> <li>• Asistir en la ubicación geográfica del proyecto.</li> </ul>
INGENIERÍA BÁSICA	<p><i>PHA - Preliminary Hazards Analysis</i> (Análisis de peligros preliminares)</p> <p><i>HAZID - Hazard Identification</i> (Identificación de peligros)</p> <p><i>CHECKLIST</i> (Lista de chequeo)</p> <p><i>WHAT IF</i> (¿Qué pasa si?)</p> <p><i>FMEA - Failure Mode Effects Analysis</i> (Análisis de Modos y Efectos de Fallos)</p> <p><i>HAZOP - Hazard and Operability</i> (Análisis Funcional de Operatividad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar los peligros de manera más detallada en el proceso seleccionado y en el diseño propuesto.</li> <li>• Riesgos asociados a la ubicación geográfica.</li> <li>• Riesgos en equipos especiales o críticos en el proceso.</li> </ul>

Continúa

FASE DEL PROYECTO	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS	RESULTADOS ESPERADOS
INGENIERÍA DETALLADA	<p><i>CHECKLIST</i> (Lista de chequeo)</p> <p><i>WHAT IF?</i> (¿Qué pasa si?)</p> <p><i>FMEA - Failure Mode Effects Analysis</i> (Análisis de Modos y Efectos de Fallos)</p> <p><i>PHA - Preliminary Hazards Analysis</i> (Análisis de peligros preliminares)</p> <p><i>HAZOP - Hazard and Operability</i> (Análisis Funcional de Operatividad)</p> <p>Metodología <i>BOW-TIE</i></p> <p>Estudios de elementos críticos, seguridad.</p> <p>Barreras y estándares de rendimiento.</p> <p><i>SIL - Safety Integrity Level / VERIFICATION AND SRS - Safety Requirement Specification</i> (Nivel de integridad de seguridad / Especificación de requisitos de seguridad)</p> <p><i>QRA - Quantitative Risk Assessment</i> (Análisis Cuantitativo de Riesgo)</p> <p><i>FHA - Fire Hazard Analysis</i> (Análisis del Peligro de Incendio)</p> <p><i>RAMS - Reliability, Availability, Maintainability And Safety</i> (Fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar todos los peligros en el proceso, evaluando los riesgos asociados.</li> <li>• Identificar aspectos de la operación no contemplados inicialmente.</li> <li>• Ayudar a establecer procedimientos de operación y puesta en marcha.</li> </ul>

Continúa

FASE DEL PROYECTO	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS	RESULTADOS ESPERADOS
INGENIERÍA DETALLADA	<p><i>RBI Risk-Based Inspection Studies / RCM Risk Centered Maintenance</i> (Estudios de inspección basada en riesgos / Mantenimiento Centrado en el riesgo)</p> <p><i>EERA - Escape, Evacuation And Rescue Analysis</i> (Escape, evacuación y análisis de rescate)</p> <p><i>SVA - Security Vulnerability Analysis</i> (Análisis de vulnerabilidad de seguridad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificar todos los peligros en el proceso, evaluando los riesgos asociados.</li> <li>• Identificar aspectos de la operación no contemplados inicialmente.</li> <li>• Ayudar a establecer procedimientos de operación y puesta en marcha.</li> </ul>
INSTALACIONES EN OPERACIÓN	<p><i>CHECKLIST</i> (Lista de chequeo)</p> <p><i>HAZOP - Hazard and Operability</i> (Análisis Funcional de Operatividad)</p> <p><i>SIL - Safety Integrity Level / VERIFICATION AND SRS - Safety Requirement Specification</i> (Nivel de integridad de seguridad / Especificación de requisitos de seguridad)</p> <p><i>FHA - Fire Hazard Analysis</i> (Análisis del Peligro de Incendio)</p> <p><i>QRA - Quantitative Risk Assessment</i> (Análisis Cuantitativo de Riesgo)</p> <p><i>RAMS - Reliability, Availability, Maintainability And Safety</i> (Fiabilidad, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar la operación y que la información sobre la calidad, los requisitos legales, la seguridad del proceso y los procedimientos operativos esté completa y actualizada.</li> <li>• Incorporar las lecciones aprendidas de accidentes o incidentes recientes y considerar la posibilidad de agregar nuevos equipos, sistemas y tecnologías que mejoren los niveles de seguridad.</li> </ul>

Continúa



FASE DEL PROYECTO	METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGOS	RESULTADOS ESPERADOS
INSTALACIONES EN OPERACIÓN	<p><i>RBI Risk-Based Inspection Studies/ RCM Risk Centered Maintenance</i> (Estudios de inspección basada en riesgos / Mantenimiento Centrado en el riesgo)</p> <p><i>EERA - Escape, Evacuation And Rescue Analysis</i> (Escape, evacuación y análisis de rescate)</p> <p><i>SVA - Security Vulnerability Analysis</i> (Análisis de vulnerabilidad de seguridad)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asegurar la operación y que la información sobre la calidad, los requisitos legales, la seguridad del proceso y los procedimientos operativos esté completa y actualizada.</li> <li>Incorporar las lecciones aprendidas de accidentes o incidentes recientes y considerar la posibilidad de agregar nuevos equipos, sistemas y tecnologías que mejoren los niveles de seguridad.</li> </ul>

Fuente: [35].

### 4.3 Metodología

La estructura metodológica se evidencia más adelante, en la figura 4.6, bajo la metodología SIX SIGMA. A continuación, se presentan los resultados organizados siguiendo la estructura presentada en la misma figura, compuesta por tres fases.

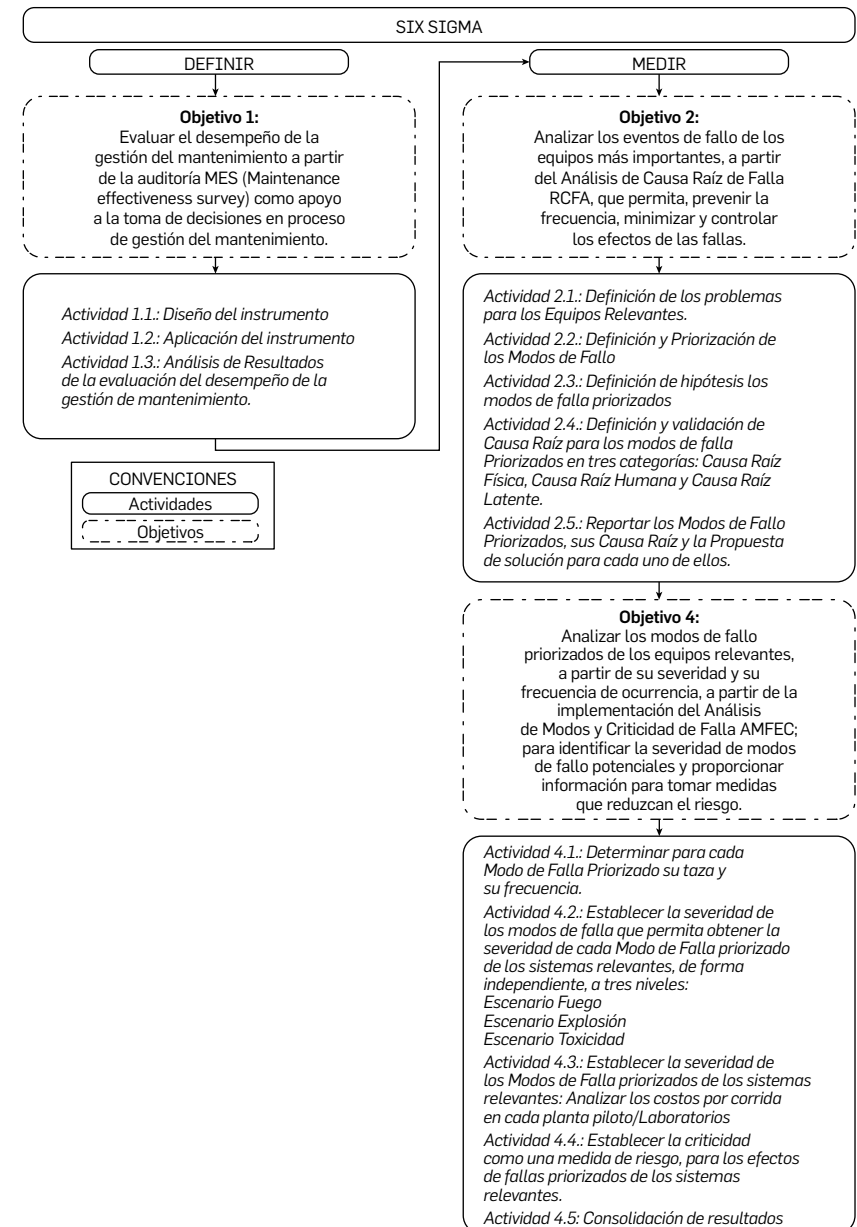
#### Fase I

##### Actividad 1.1.

*Diseño del instrumento para el diagnóstico del área de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector oil & gas*

La metodología desarrollada y validada por el *Marshall Institute* llamada MES (*Maintenance Effectiveness Assessment*) se aplicó a los líderes de las plantas piloto con el fin de de conseguir un

Figura 4.6. Diagrama de relación de la estructura metodológica utilizada en el Plan Detallado de Trabajo PDT.



diagnostico real de la situación actual en tema de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector *oil & gas*. Los instrumentos MES se elaboraron tomando como base a [23] y se ajustaron al contexto operacional. El instrumento se organizó en seis categorías:

- Recursos gerenciales consta de 12 preguntas. Máximo de puntos = 60.
- Gerencia de la información consta de 11 preguntas. Máximo de puntos = 55.
- Equipos y técnicas de mantenimiento preventivo consta de 12 preguntas. Máximo de puntos = 60.
- Planificación y ejecución consta de 12 preguntas. Máximo de puntos = 60.
- Soporte, calidad y motivación consta de 11 preguntas. Máximo de puntos = 55.
- Aspectos técnicos asociados a la gestión de mantenimiento consta de 14 preguntas. Máximo de puntos = 70.

La evaluación del instrumento se organizó en seis opciones:

- Muy deficiente: 1
- Deficiente: 2
- Regular: 3
- Bueno: 4
- Excelente: 5
- No sabe/No responde
- No Aplica

### *Actividad 1.2.*

#### *Aplicación del instrumento para el diagnóstico para el área de mantenimiento*

La duración aproximada en la aplicación del instrumento fue de 20 minutos, durante los cuales fueron entrevistados los líderes de las plantas piloto.

### *Actividad 1.3.*

#### *Análisis de resultados del diagnóstico del área de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector oil & gas*

Las puntuaciones totales fueron sumadas y promediadas entre el número total de las personas encuestadas. Se clasificó la categoría del área de mantenimiento en función de los siguientes rangos:

- 360 - 289: Categoría "Clase Mundial"/nivel de excelencia del mantenimiento
- 288 - 217: Categoría "Muy buena"/nivel buenas prácticas de mantenimiento
- 216 - 145: Categoría "Por arriba del nivel promedio"/nivel aceptable en mantenimiento.
- 144 - 73: Categoría "Por debajo del nivel promedio"/nivel no muy bueno de mantenimiento con oportunidades para mejorar.
- Menos de 73: Categoría "Muy por debajo del promedio"/nivel muy malo de mantenimiento con muchas oportunidades para mejorar.

Los resultados del diagnóstico son presentados mediante un diagrama radial. Se resaltan los aspectos en donde los encuestados evalúan: Muy deficiente, Deficiente y Regular, para plantear a futuro acciones de mejora.

## Fase II

### *Actividad 2.1.*

#### *Definición de los problemas para los equipos relevantes*

Para la definición de tipos de fallo, se tomó como base la *Guía proceso de eliminación de defectos* de la empresa, la cual comprende las actividades necesarias para determinar la propuesta de solución de un incidente o fallo con el fin de eliminar la causa raíz y evitar su repetición o mitigar sus consecuencias. Posteriormente, se desarro-

lló la primera de las cuatro etapas de la guía, donde se analiza el problema y es definido el nivel de investigación de los eventos basados en la matriz de valoración de riesgos RAM, lo que permite establecer las metodologías a implementar. Finalmente, se determinó para el nivel N1 denominado *Consecuencia baja*, la metodología de los cinco porqués mediante la implementación de los formatos oficiales de la empresa.

### Actividad 2.2.

#### Definición y priorización de los tipos de fallo

Es llevada a cabo basados en la sección sobre Mecanismo de fallo de [37] en la norma ISO 14224, la cual hace referencia al mecanismo de fallo como un proceso físico o químico, o cualquier otro proceso o combinación de proceso que conducen al fallo. El mecanismo de fallo es un atributo del evento de fallo que se puede deducir técnicamente, un ejemplo sería, la causa aparente observada del fallo. Así pues, los códigos en el mecanismo de fallos están básicamente relacionados con una de las siguientes categorías príncipes de tipos de fallo propuestos por [37]:

- Fallos mecánicos.
- Fallos de material.
- Fallos de instrumentación.
- Fallos eléctricos.
- Influencia externa.
- Varios.

Una vez definidos los tipos de fallo, se realizó una priorización de estos. Se hace necesaria la priorización de los tipos de fallo ya que el análisis de causa raíz (ACR), siguiente fase de la investigación, es aplicada a los tipos de fallo y un equipo puede presentar múltiples tipos de fallo. La priorización de los tipos de fallo se llevó a cabo para las plantas piloto, según el tipo de fallo presentado en los históricos de fallos del 2013 y 2017, en función del nivel de criticidad de los mismos según el indicador de riesgo total anual (RTA) propuesto por Crespo [23], expuesto a continuación:

#### Ecuación 1

$$RTA=CAR+PAF$$

#### Ecuación 2

$$CAR=FF*(CMO+CM)$$

#### Ecuación 3

$$PAF=FF*PE$$

#### Ecuación 4

$$PE=TR*IP$$

Donde:

- CAR: coste anual de reparación (pesos/año).
- PAF: penalización anual por fallos (pesos/año).
- FF: frecuencia de fallo (fallos/año).
- CMO: costes mano de obra por fallo (pesos/fallo).
- CM: costes materiales por fallo (pesos/fallo).
- TR: tiempo de reparación (horas/fallo).
- IP: impacto de producción (pesos/hora).
- PE: penalización por evento fallo (pesos/fallo).

Las variables de CMO, CM, TR e IP, son determinadas a partir de un promedio entre sus respectivos valores, con la finalidad de calcular la variable según su unidad.

Los costos de mano de obra, de materiales y el tiempo de reparación, son solicitados a la empresa para cada uno de los eventos registrados en los históricos de fallos. El impacto de la producción es determinado recolectando información de los AMFE respectivos, de una columna que representa la producción perdida en dólares por hora, la cual fue llevada a pesos colombianos empleando la tasa representativa del mercado (TRM) para el año evaluado del evento correctivo, esta tasa es obtenida del Banco de la República de Colombia. Una vez definido el valor RTA y jerarquizado cada tipo de fallo, se utilizó el criterio de Pareto para analizar y definir las hipótesis de los tipos de fallos que generan el 80 % de las pérdidas [38].

### Actividad 2.3.

#### Definición de hipótesis los tipos de fallo priorizados

Son definidas y validadas las hipótesis durante el proceso de ACR en conjunto con el diferente personal que intervino, sean líderes de planta piloto, mantenedores del área de mantenimiento u operarios de las plantas.

### Actividad 2.4.

#### Reportar los tipos de fallo priorizados, sus causa raíz y la propuesta de solución para cada uno de ellos

Una vez priorizados los tipos de fallo conocemos el objetivo de implementación del análisis de causa raíz. Se aplica el método de análisis de causa raíz (ACR) para los tipos de fallo priorizados en las plantas piloto.

Para el desarrollo de la presente sección se empleó el manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz [39], el cual consta de cuatro fases explicadas con más detalle a continuación en la tabla 4.3.

### Actividad 2.5.

#### Definición de causa raíz para los tipos de fallo priorizados en tres categorías: causa raíz física, causa raíz humana y causa raíz latente

Finalmente, con las causas raíz encontradas se determinaron cuáles de ellas son de categoría física, humana o latente, según la definición presentada en el marco teórico de la presente investigación.

Tabla 4.3. Metodología de análisis de causa raíz

Fases	Descripción	Pasos
I. Registro de incidentes o malos actores	La captura (registro) de un incidente o mal actor junto con la información relevante, decidir si se debe realizar un ACR y a qué nivel se debe conducir la investigación en caso de ser necesario	1. Reporte de incidentes o malos actores
		2. Clasificación de Incidentes o jerarquización de malos actores
II. Análisis de problemas	Dividir una situación compleja en porciones manejables. Respuestas a "¿cuál es el problema?"	3. Identificación de problema
		4. Definición de problemas
III. Análisis de causa raíz	La búsqueda sistemática de las causas de un problema. Respuestas a "¿por qué?"	5. Análisis de causas posibles
		6. Validación de datos
		7. Verificación de causas
IV. Desarrollo de la solución	Una técnica sistemática para seleccionar la alternativa más balanceada (una que elimine las causas sin crear nuevos o peores problemas).	8. Selección de criterios

Fuente: Manual para aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas [40].

## Fase III

### Actividad 3.1.

#### Determinar la frecuencia para cada tipo de fallo priorizado

Se determina para los tipos o tipos de fallo priorizado en la Actividad 2.2., que cuenten con la información necesaria, su respectiva frecuencia, empleando la información suministrada en los históricos de fallos del 2013 al 2017 suministrados por la empresa. Se calculó la frecuencia para los tipos de fallo, mediante el siguiente cálculo [41]:

#### Ecuación 5

$$\text{Frecuencia } P = (Q.\text{eventos del MFP})/\text{Tiempo}$$

Donde:

- MTBF: Tiempo medio entre fallos. Hace referencia al tiempo que paso desde que ocurrió un fallo, hasta que ocurrió otro del mismo modo de fallo.
- Q. eventos del MFP: Cantidad de eventos registrados para los tipos de fallo priorizados.
- Tiempo: Rango de tiempo para el cual se trabaja la información.

#### *Actividad 3.2.*

##### *Establecer la severidad de los tipos de fallo priorizados*

Una vez terminado el análisis de ACR definiendo el tipo de causa raíz, se procedió con el análisis de severidad del tipo de fallo priorizado.

Establecida la severidad en los tipos y tipos de fallo priorizados, se escoge establecer la severidad a partir de la metodología actualmente empleada por la empresa en función de los escenarios de: (i) fuego, (ii) explosión y (iii) toxicidad, al mismo tiempo. Para esto se utilizó el formato el cual es resuelto por tipo de fallo priorizados, por parte de los respectivos líderes.

#### *Actividad 3.3.*

##### *Analizar los costos por incidente de los tipos de fallo priorizados*

Con el propósito de analizar los costos por cada incidente registrado de los tipos de fallo priorizados se llevó a cabo el cálculo del indicador de riesgo total anual (RTA), propuesto por Crespo [23] presentado anteriormente en la metodología de la Actividad 2.2., se empleó la información recolectada en esa misma actividad. Adicionalmente, se presenta un gráfico de línea de tiempo con los resultados. Este indicador es calculado para cada planta piloto que cuenta con la información necesaria para su respectivo cálculo.

#### *Actividad 3.4.*

##### *Establecer la criticidad como una medida de riesgo para los efectos de los tipos de fallo priorizados*

La criticidad del efecto de los tipos de fallo se estableció a partir de la matriz RAM a partir de dos fases. La primera fase consistió en identificar para todos los tipos de fallo priorizados de las plantas piloto sus "efectos". La segunda fase consistió en evaluar la "criticidad" de cada uno de los efectos identificados a partir de la valoración RAM. Adicionalmente, se actualizó el estudio de modos y efectos de fallo (AMFE) para las plantas piloto, los cuales fueron provistos por la empresa, planteándose recomendaciones a partir de la norma española (UNE-EN-60812) con respecto al procedimiento de análisis de los modos de fallo y de sus efectos (AMFE), de diciembre 2008.

## 4.4 Resultados

A continuación, se presentan los resultados organizados siguiendo la estructura presentada en la sección metodología, compuesta por las tres fases.

### Fase I

#### *Actividad 1.1.*

##### *Diseño del instrumento para el diagnóstico del área de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector oil & gas*

### Resultados

El instrumento cuenta con seis perspectivas: "recursos gerenciales" responde doce preguntas, "gerencia de la información" responde once preguntas, "equipos y técnicas de mantenimiento preventivo"

responde doce preguntas, "planificación y ejecución" responde doce preguntas, "soporte, calidad y motivación" responde once preguntas, "aspectos técnicos asociados a la gestión del mantenimiento" responde catorce preguntas.

*Actividad 1.2.*

*Aplicación del instrumento para el diagnóstico para el área de mantenimiento*

**Resultados**

Fue encuestado todo el personal planificado asociado a líderes de las plantas piloto en cuestión.

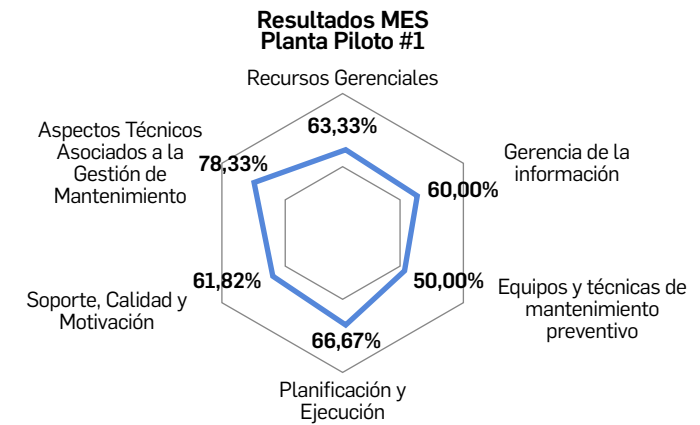
*Actividad 1.3. Análisis de resultados del diagnóstico del área de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector oil & gas*

**Resultados**

A continuación, se exponen los resultados del diagnóstico del área de mantenimiento en un Centro de Innovación y Tecnología, del sector *oil & gas*, para una muestra de ocho plantas piloto. Se exponen mediante figuras de tipo radial los resultados del instrumento MES para las ocho plantas piloto.

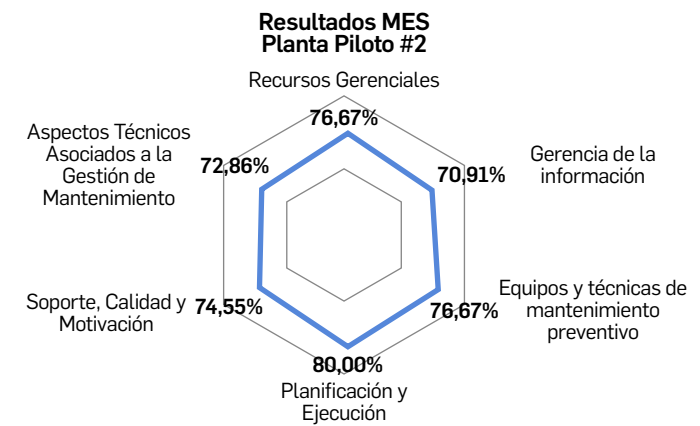
En la tabla 4.4 (página 291) se planten las acciones de mejora genéricas para cada una de las preguntas con respuestas: Muy Deficiente, Deficiente y Regular.

Figura 4.7. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 1



Categoría: 217–288, categoría "Muy buena"/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

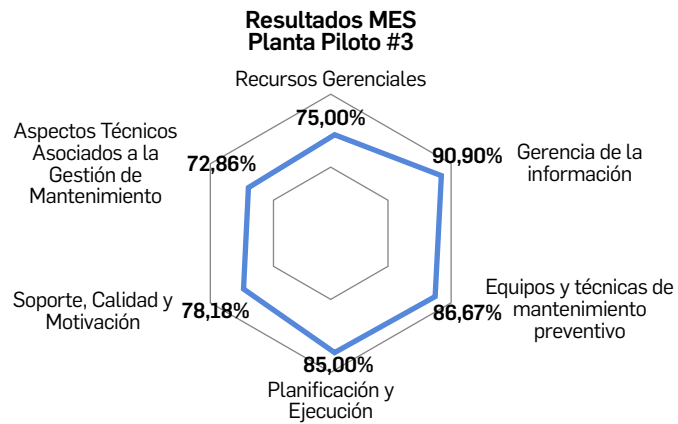
Figura 4.8. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 2



Categoría: 217-288, categoría "Muy buena"/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

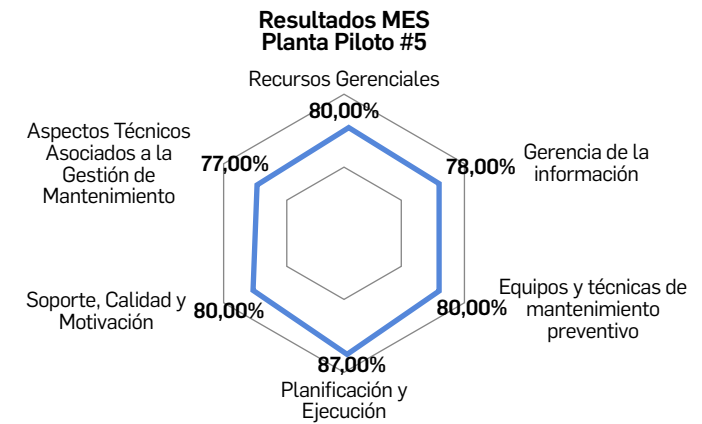


Figura 4.9. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 3



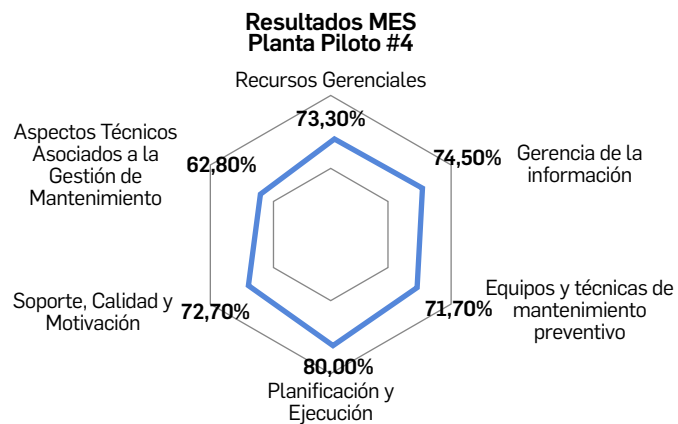
Categoría: 300–261, categoría “Clase Mundial”/nivel de excelencia en mantenimiento.

Figura 4.11. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 5



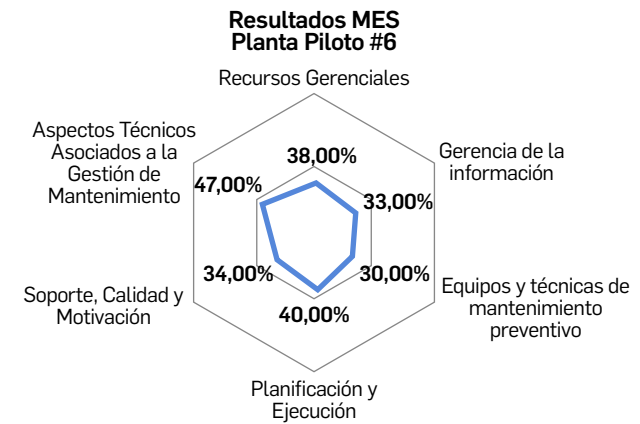
Categoría: 300–261, categoría “Clase Mundial”/nivel de excelencia en mantenimiento.

Figura 4.10. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 4



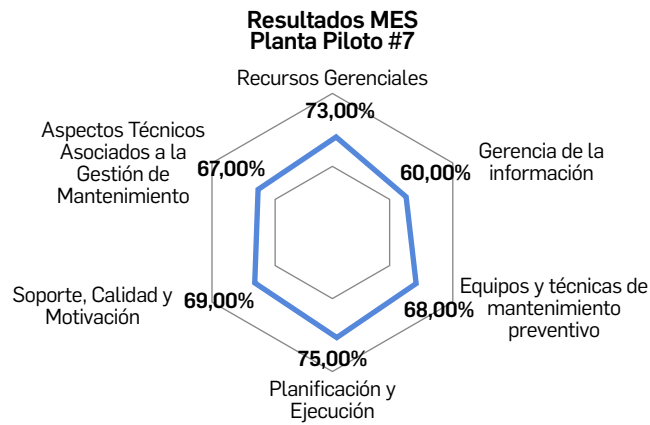
Categoría: 217–288, categoría “Muy buena”/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

Figura 4.12. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 6



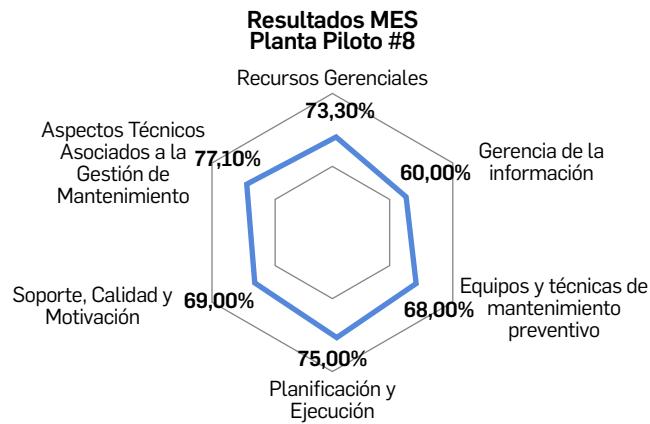
Categoría: 217–288, categoría “Muy buena”/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

Figura 4.13. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 7



Categoría: 217–288, categoría "Muy buena"/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

Figura 4.14. Representación gráfica resultados aplicación MES, planta piloto 8



Categoría: 217–288, categoría "Muy buena"/nivel buenas prácticas de mantenimiento.

Tabla 4.4. Acciones de mejora respuestas mes

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Recursos gerenciales	1	¿Usted siente que el área de mantenimiento está dotada para realizar su trabajo?	Diseñar una lista de chequeo que incluya los recursos necesarios para realizar la labor.
	2	¿La estructura completa del área de mantenimiento parece ser lógica y favorece al cumplimiento de las actividades de mantenimiento?	Se recomienda revisar la estructura del área.
	3	¿El área de mantenimiento ayuda a eliminar las barreras que el mantenedor encuentra en su trabajo y de las cuales no tiene control?	Promover unión de trabajo entre operación y mantenimiento.
			Se recomienda realizar capacitaciones al personal de mantenimiento.
	4	¿La dirección del ICP estimula al área de mantenimiento a alcanzar las metas de los líderes de los laboratorios y plantas piloto?	Promover unión de trabajo entre líderes de operación y personal de mantenimiento
	5	¿La dirección del ICP estimula a los líderes de laboratorios y plantas piloto a que ayuden a mantenimiento en la realización de sus actividades?	Promover realización de actividades proactivas de mantenimiento.
			Promover la participación de los líderes de operación en la labores de mantenimiento.
6	¿Se desarrollan equipos de trabajo entre mantenimiento y la operación (laboratorios-plantas piloto), para resolver problemas que afecten a ambas partes?	Es importante conformar equipos multidisciplinarios para resolver problemas que afecten a las áreas de mantenimiento y de operación.	
7	¿La dirección del ICP estimula al personal de mantenimiento y a los líderes de laboratorio y plantas piloto a que trabajen juntos en la resolución de problemas que afectan la disponibilidad de los equipos I+D?		

Continúa

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Recursos gerenciales	10	¿La dirección del ICP revisa y le hace seguimiento a los objetivos de las plantas piloto y los laboratorios en reuniones de trabajo con el personal de mantenimiento y líderes de laboratorios y plantas piloto?	Gestionar la socialización de los objetivos y metas a cumplir a todo el personal de mantenimiento. Se recomienda gestionar la participación de los líderes del área de mantenimiento en la definición y cumplimiento de objetivos y metas propuestas.
	12	¿Los objetivos del área de mantenimiento están alineados con la visión y misión de la dirección del ICP?	Socializar e interiorizar la misión y visión del Centro de Innovación y Tecnología al personal ejecutor del mantenimiento.
Gerencia de la información	13	¿La organización utiliza de forma eficiente el sistema computarizado de gestión del mantenimiento (SAP)?	Facilitar cursos de la plataforma de información al personal correspondiente.
	15	¿La organización mantiene actualizado el SAP?	Se recomienda realizar un adecuado seguimiento de las O.T. hasta su cierre.
	16	¿Ha sido el personal debidamente entrenado para su uso?	Facilitar cursos de la plataforma de información al personal correspondiente.
	17	¿La organización mantiene registros precisos de fallas en sus sistemas?	Promover una cultura de actualización continua del sistema de información.
	18	¿Están los materiales y repuestos codificados en SAP?	Se recomienda mejorar la forma de catalogar y codificar los diferentes elementos de sistema de información.
	19	¿Se toman decisiones a partir de los reportes generados por SAP?	Se recomienda actualizar la plataforma de información teniendo en cuenta las necesidades en el proceso de toma de decisiones.
	20	¿La organización evalúa los tiempos operativos y fuera de servicio?	Incluir y monitorizar en el sistema de información parámetros útiles para generar estrategias de mejora.

Continúa

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Gerencia de la información	22	¿La organización del mantenimiento se compara para medir su desempeño?	Se recomienda establecer un equipo de seguimiento y control que permita comparar su desempeño. Realizar análisis mensuales en base a las actividades gestionadas el mes anterior, asimismo, identificar falencias y realizar acciones de mejor respecto a estos incidentes.
	24	¿El área del mantenimiento utiliza algún tipo de medida de comparación (costos de mantenimiento/costos de producción)?	Se recomienda actualizar la plataforma de información teniendo en cuenta las necesidades en el proceso de toma de decisiones.
Equipos y técnicas de mantenimiento Preventivo	26	¿Se revisan periódicamente los planes de MP, aumento/descenso, necesidades de adiestramiento, etc.?	
	27	¿El área de mantenimiento tiene personal dedicado exclusivamente a realizar actividades de mantenimiento preventivo (MP)?	Conformar equipos de personal de mantenimiento que se dediquen exclusivamente a realizar actividades de mantenimiento preventivo.
	28	¿El personal de los laboratorios y plantas piloto, ayudan en las actividades de mantenimiento autónomo (limpieza, lubricación, ajustes e inspección visual)?	Promover al personal correspondiente sobre las buenas prácticas del mantenimiento autónomo.
	29	¿El área de mantenimiento utiliza técnicas de mantenimiento predictivo (vibración, análisis de aceite, ultrasonido, etc.)?	Enfocar capital humano a investigar las diferentes técnicas de mantenimiento predictivo enfocado a los equipos relevantes de las plantas piloto y laboratorios.
	30	¿El área de mantenimiento les hace seguimiento a los costos de mantenimiento preventivo y predictivo?	Se recomienda implementar indicadores de gestión para llevar dicho seguimiento.
	31	¿Los grupos de producción y operaciones permiten que el personal de mantenimiento tenga acceso a los equipos en las fechas estimadas de mantenimiento preventivo (MP)?	Informar adecuadamente las fechas estimadas para las acciones de mantenimiento preventivo a los grupos de producción y operaciones.

Continúa

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Equipos y técnicas de mantenimiento Preventivo	32	¿El área de mantenimiento tiene la cultura de analizar y evitar las fallas repetitivas?	Generar capacitaciones en el personal de mantenimiento asociado a las buenas prácticas de sus actividades.
	33	¿Se incluye al personal de mantenimiento, laboratorios y plantas piloto en el proceso de evaluación de equipos nuevos?	Se recomienda durante el proceso de incorporación de equipos tener en cuenta la opinión del personal de la operación.
	35	¿Se adiestra de forma adecuada a las personas que van a mantener los equipos nuevos?	Realizar capacitaciones específicas referente a los equipo con la ayuda de instructores de casa matriz.
	36	¿Las gerencias del ICP hacen seguimiento y evalúa los costos de operación y mantenimiento, a lo largo del ciclo de vida de sus activos?	Implementar indicadores de gestión que permitan llevar el seguimiento de los costos de la operación y el mantenimiento, a lo largo del ciclo de vida de los activos.
Planificación y ejecución	37	¿Son priorizadas las actividades de mantenimiento correctivo/preventivo?	Realizar priorización de equipos y modos de fallo, y teniendo en cuenta los resultados, generar orden de prioridad para las actividades de mantenimiento.
	41	¿El área de mantenimiento registra la información obtenida por la ejecución de la actividad de mantenimiento (correctiva/preventiva)?	Realizar capacitaciones al personal responsable de llevar los registros de la información por la ejecución de la actividad de mantenimiento en el sistema de información.
	43	¿Son las actividades correctivas bien planificadas antes de ejecutarse?	Se recomienda la organización de cada una de las actividades a realizar en las acciones correctivas permitiendo la organización y ejecución planificada.
	44	¿El área de mantenimiento utiliza planificadores de mantenimiento para preparar el alcance de mantenimiento mayor asociado a plantas piloto?	Diseñar un procedimiento mediante el cual el área de mantenimiento pueda elaborar planes mayores asociados a las plantas piloto.
	45	¿El área de mantenimiento utiliza contratistas calificados para realizar labores de mantenimiento?	Se recomienda estudiar la situación actual para enfocar la contratación del personal de mantenimiento en función de estos problemas.

Continúa

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Planificación y ejecución	48	¿Se define el camino crítico de los mantenimientos mayores asociados a las plantas piloto y se identifican los repuestos críticos?	Se recomienda realizar estudios para la jerarquización de los componentes y realizar planificación de las acciones correctivas.
Soporte, Calidad Y Motivación	49	¿Están disponibles los repuestos y materiales a la hora de ejecutar actividades de mantenimiento?	Se recomienda establecer modelos de inventarios asociados a las características de los equipos.
	50	¿Está el proceso de compra de repuestos bien organizado y sus tiempos de repuesta son eficientes?	Realizar una revisión y actualización del proceso de compra de repuestos.
	51	¿Se controla bien la salida y entrada de repuestos a la bodega de materiales?	Se recomienda mejorar la segmentación por componentes en los sistemas de información.
	52	¿Se tiene un proceso de cuantificación de <i>stock</i> de repuestos que incluya el criterio del impacto de no tener el repuesto en la bodega de materiales?	Realizar un estudio de inventarios que evalúe el impacto de no contar con <i>stock</i> para repuestos críticos en bodega de materiales.
	53	¿Se tienen identificados los tiempos de reposición y los costos de los repuestos?	Se recomienda realizar catalogación de los componentes críticos y mantenerlos en <i>stock</i> .
	54	¿El criterio de calidad en el desarrollo de las actividades de mantenimiento está por encima del criterio de rapidez?	Se recomienda establecer los criterios más importantes a la hora de realizar las actividades de mantenimiento con personal de operación y mantenimiento.
	55	¿Se tiene un proceso que permita verificar la calidad de las actividades de mantenimiento ejecutadas?	Realizar actividades que permitan verificar la calidad de las tareas ejecutadas por mantenimiento.
	56	¿Es la calidad en el área de mantenimiento un objetivo importante?	Se recomienda analizar los objetivos primordiales del área de mantenimiento.
	57	¿Tiene la organización un interés real en satisfacer las diferentes necesidades de sus trabajos?	Concientizar a la organización mediante charlas, sobre los beneficios económicos que acarrea a está satisfacer las necesidades de sus trabajos mediante un interés real.

Continúa

Perspectiva	N.º de Preg.	Pregunta	Acción de mejora
Aspectos Técnicos asociados a la Gestión de Mantenimiento	65	¿La disponibilidad media de la planta es adecuada?	Realizar estudios sobre el tema con el propósito de darle una solución pertinente al problema.
	68	¿La evolución del tiempo medio entre fallos en equipos esenciales es positiva?	Se recomienda calcular indicadores clave para mejorar la gestión del área de mantenimiento.
	69	¿El número de órdenes de mantenimiento (OM) de emergencia es bajo?	
	70	¿El número de OM de emergencia está descendiendo?	
	71	¿El tiempo medio de reparación en equipos esenciales está descendiendo?	
	72	¿El tiempo medio de reparación en equipos esenciales es bajo?	
	74	¿El número de averías repetitivas está descendiendo?	
	75	¿El número de horas/hombre invertidas en mantenimiento es el adecuado?	Realizar planes de optimización con el propósito de mantener o subir el indicador.
	76	¿El número de horas/hombre invertidas en mantenimiento está descendiendo?	Se recomienda calcular indicadores clave para mejorar la gestión del área de mantenimiento.
	77	¿El gasto en repuestos es el adecuado?	Realizar estudios sobre el tema con el propósito de darle una solución pertinente al problema.
78	¿El gasto en repuestos está descendiendo?	Se recomienda calcular indicadores clave para mejorar la gestión del área de mantenimiento.	

## Fase II

### Actividad 2.1.

*Definición de los problemas para los equipos relevantes*

### Resultados

Debido a que la empresa no cuenta con un formato de modos de fallo estandarizado para las plantas piloto y, adicionalmente, en su sistema de información se definen como un único activo, los modos de fallo serán definidos según el tipo de fallo presentado, es decir, eléctrico, mecánico e instrumental.

### Actividad 2.2.

*Definición y priorización de los tipos de fallo*

### Resultados

Los tipos de fallo se definieron como: mecánico, eléctrico, electrónico e instrumental, esto se registra en los históricos de fallo suministrados por la empresa. Este tipo de fallo se priorizan según el cálculo del riesgo total anual (RTA). Trabajando el 80 % de los tipos de fallo priorizados para cada planta piloto expuesta. La priorización de los tipos de fallo para las plantas piloto se presenta en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Tipos de fallo priorizados para cada planta piloto

Tipo de fallo	Porcentaje relativo	Porcentaje acumulado
<b>Planta piloto 1</b>		
Instrumental	49,76 %	49,76 %
Mecánico	25,65 %	75,41 %
Eléctrico	24,59 %	100,00 %

Continúa

Tipo de fallo	Porcentaje relativo	Porcentaje acumulado
<b>Planta piloto 2</b>		
Instrumental	49,83 %	49,83 %
Mecánico	41,34 %	91,17 %
Eléctrico	8,83 %	100,00 %
<b>Planta piloto 3</b>		
Mecánico	100 %	100 %
<b>Planta piloto 4</b>		
Instrumental (taponamiento)	33,74 %	33,74 %
Instrumental (deficiencia estructural)	32,71 %	66,45 %
Instrumental (falla comunicaciones)	22,03 %	88,48 %
Salida Errática	11,52 %	100 %
<b>Planta piloto 5</b>		
Mecánico	62,54 %	62,54 %
Instrumental	18,95 %	81,49 %
Eléctrico	18,51 %	100 %
<b>Planta piloto 6</b>		
Mecánico	58,35 %	58,35 %
Eléctrico	29,76 %	88,11 %
Instrumental	11,89 %	100 %
<b>Planta piloto 7</b>		
Mecánico	71,00 %	71,00 %
Instrumental	29,00 %	100 %
<b>Planta piloto 8</b>		
Mecánico	66,47 %	66,47 %
Eléctrico	19,45 %	85,92 %
Electrónico	14,02 %	99,94 %
Instrumental	0,06 %	100 %

### Actividad 2.3.

Definición de hipótesis los tipos de fallo priorizados

### Resultados

A continuación, se presenta la definición y la respectiva verificación de las hipótesis durante el proceso de ACR para las plantas piloto expuestas.

Tabla 4.6. Resultados de la definición y verificación de hipótesis para los tipos de fallo priorizados

Planta	Tipo de fallo	Hipótesis
Planta piloto 1	Instrumental	Taponamiento
	Mecánico	Sobrepresión en el ajuste de la rosca del reactor
Planta piloto 2	Mecánico	Coquización del flujo de la línea
	Instrumental	Ciclo de vida útil
		Falla prematura
		Ausencia de mantenimiento proactivo
		Backpressure de nitrógeno sin regulación
Planta piloto 3	Mecánico	Inicialmente se puede concluir que el problema se ubica en el <i>chiller</i> del estabilizador de la planta
Planta piloto 4	Instrumental (taponamiento)	Válvula no disminuye nivel
		Falla controlador de flujo
	Instrumental (deficiencia estructural)	Medidores y válvulas deteriorados
		Explosión del <i>Ritter</i>
Instrumental, (falla de comunicación)	Medidor del flujo averiado	

Continúa



Planta	Tipo de fallo	Hipótesis
Planta piloto 5	Mecánico	Contaminación de la bomba de vacío
		Fallas en mantas de calentamiento
		Ausencia de mantenimiento
		Desgaste en junta cardánica
	Instrumental	Daños en sensores de vacío
		Fallo por mal uso
		Descalibración por RTD
Planta piloto 6	Mecánico	La falla de la bomba Eldex interrumpe el proceso petroquímico hidrocrqueo
Planta piloto 7	Mecánico	Localizado en los controlador H2- vasos reguladores de aire (STD)
	Instrumental	Localizados en el sensor de gases N6L3M9 PP1 (OTH)
Planta piloto 8	Eléctrico	Sobrepresión en la línea
		Horno no logra llegar a la temperatura indicada
		Carga no logra alcanzar la temperatura deseada
		Se evidencia por sobrecalentamiento
	Mecánico	Motor no llega a las RPM deseadas
		Eje soporte motor fracturado
		No transfiere producto hacia el tanque

**Actividad 2.4.**

*Definición y validación de causa raíz para los tipos de falla priorizados, en tres categorías: física, humana y latente*

**Resultados**

En esta sección se presenta los análisis de causas raíces elaboradas para cada planta piloto partiendo de la metodología propuesta. A continuación, se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 1 asociado al tipo de fallo mecánico, tabla 4.7.

Tabla 4.7. Análisis de causa raíz concreta, planta piloto 1: tipo mecánico

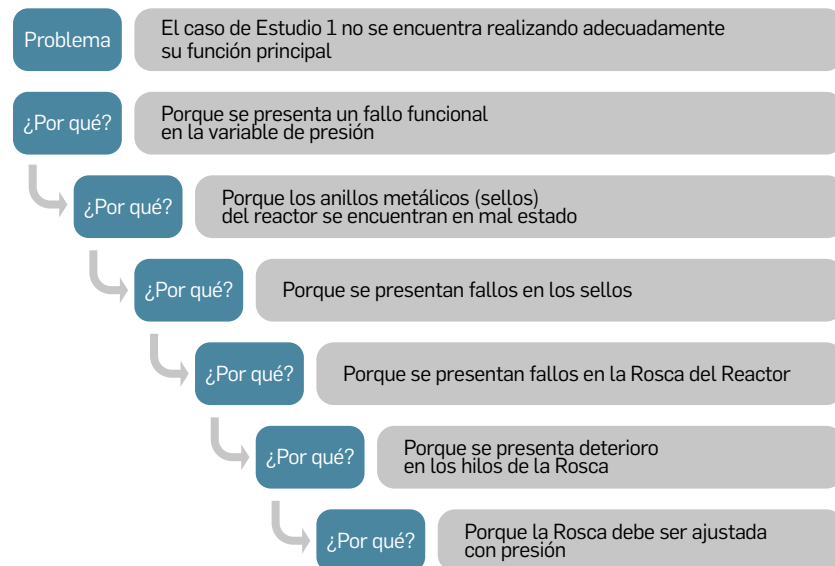
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: reporte de incidentes	OT. 67460: Descripción: "Corregir fuga de aceite bomba Milton Roy" (12/02/2014). OT. 69789: Descripción: "Separar anillos de sello incrustados reactor" (17/06/2014). OT. 71777: Descripción: "Mtto correctivo bomba dosificadora" (07/10/2014).
	Paso 2: clasificación de incidentes  Personas: 3C = Medio. Ambiental: 3C = Medio. Económica: 1E = Bajo.	Matriz RAM  Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: identificación del problema  Ventanas operativas planta piloto 1 Presión: 20-70 bar Temperatura: 450 °C máx. Velocidad espacial: 0.2-4 h-1	Esperado: ventanas operativas de la planta piloto. Actual: se encuentra en condiciones de operación. Impacto: un mes o un día laboral de horas no trabajadas, ya sea por compra o mantenimiento (asumiendo contar con los <i>kits</i> necesarios).
	Paso 4: definición del problema	Localización: sistema de presión en la unidad de reacción. Tiempo: 1 fallo (en 4 años). Extensión: puede afectar otras plantas piloto (casos excepcionales).
III. Análisis de causa raíz	Paso 5: análisis de causa posible  Diagrama 5 porqués planta piloto 1 (ver figura 4.15) Diagrama causa-efecto planta piloto 1 (ver figura 4.17)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT).
	Paso 6: validación de datos	Causa probable: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados por operarios de la planta.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
IV. Análisis de causa raíz	Paso 7: verificación de causas	Causa raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados con la OT 69789 de mantenimiento.
V. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Incluir en el estándar de trabajo una actividad para analizar los sellos del reactor de la planta. Fundamentar el estándar de trabajo para el mantenimiento preventivo de la planta, en base a un estudio del comportamiento por desgaste en función de la fiabilidad de la planta piloto. Desarrollar un procedimiento operativo para la tarea de ajustar la rosca.

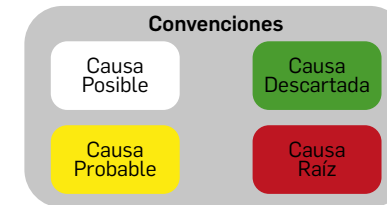
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 1. Figura 4.15.

Figura 4.15. Diagrama cinco porqués planta piloto 1



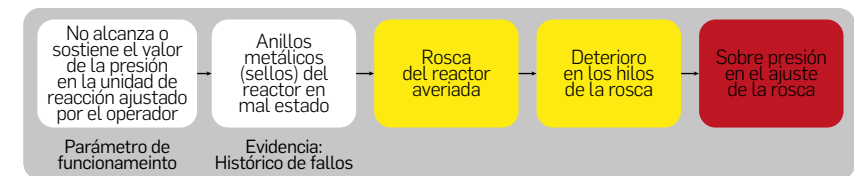
Antes de presentar los resultados, se expone en la figura 4.16 la convención de colores asociada a los diagramas de causa-efecto.

Figura 4.16. Convención de colores asociada a los diagramas de causa-efecto



A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 1.

Figura 4.17. Diagrama causa-efecto planta piloto 1



A continuación, se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 2 asociado al tipo de fallo mecánico.

Tabla 4.8. Análisis de causa raíz concreta, planta piloto 2: tipo mecánico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 71214: Descripción: "Reparación bomba de engranajes" (05/09/2014). OT. 75014: Descripción: "Reemplazo sello de mirilla nivel (NaOH)" (14/04/2015).

Continúa

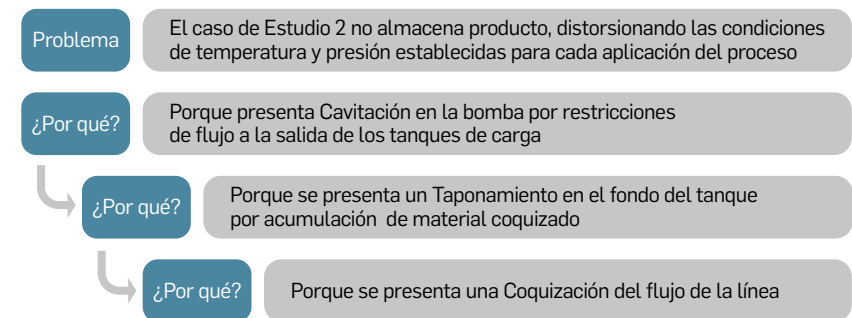
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
II. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 77183: Descripción: "Revisión cto enfriamiento y lubr P-3500" (21/08/2015). OT. 77499: Descripción: "Revisión bomba P-4701" (10/09/2015). OT. 78681: Descripción: "Limpieza exte. TK4709" (13/01/2016).
	Paso 2: Clasificación de incidentes  Personas: 3D = Medio. Ambiental: 3D = Medio. Económica: 1E = Bajo.	Matriz RAM  Global: Medio
III. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema	Esperado: ventanas operativas de la planta piloto. Actual: se encuentra en condiciones de operación. Impacto: ocho horas no trabajadas. (asumiendo una actividad normal laboral).
	Paso 4: Definición del problema	Localización: sistema de temperatura y presión. Tiempo: 2 fallos (en 4 años). Extensión: no afectan otro equipo o subcomponente.
IV. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama 5 porqués planta piloto 2 (ver figura 4.18) Diagrama causa-efecto planta piloto 2 (ver figura 4.19)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT. 71214-OT. 77499)
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados por operarios de la planta.
	Paso 7: Verificación de causas	Causa raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados con las OT 71214-77499 de mantenimiento.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
IV. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Minimizar la probabilidad de taponamiento en la línea mediante la propuesta de una técnica de diseño experimental, denominada análisis de varianza con la que se pretende analizar la dispersión dentro de una variable y frete a las demás agrupaciones o conglomerados.

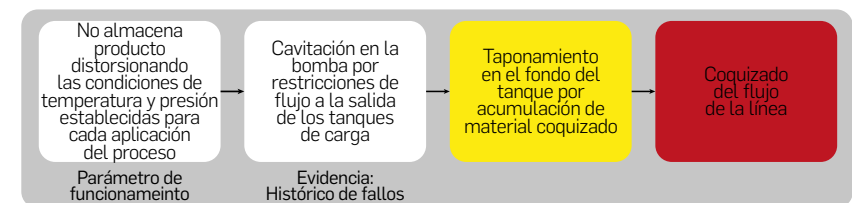
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 2.

Figura 4.18. Diagrama cinco porqués planta piloto 2



A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 2 (figura 4.18):

Figura 4.19. Diagrama causa-efecto planta piloto 2



Se presenta ahora el análisis de causa raíz para la planta piloto 3 asociada al tipo de fallo mecánico.

Tabla 4.9. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 3, tipo mecánico

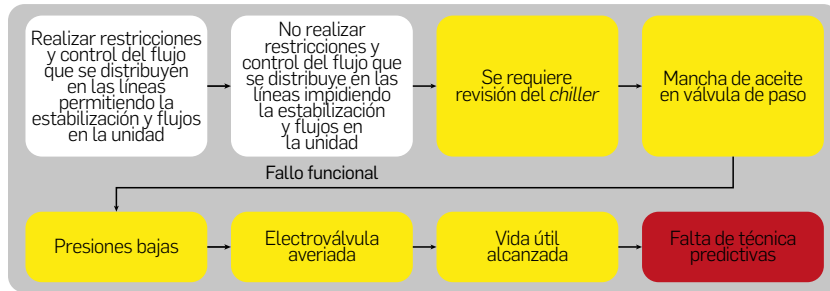
Fases	Información Recopilada	Resultados Concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	La Planta presenta una falla "en el <i>chiller</i> de estabilización, en la cual se manifiesta una mancha de aceite en la válvula de paso, verificado mediante una mancha de aceite en las tuercas entre el cobre y el aluminio, con lo que se sugieren escapes y se verifica que el equipo tiene una presión baja. Con esto se desmonta el equipo, se aplica SAES en tablero, se traslada al área de mantenimiento y se procede al arreglo de la válvula de paso, se realiza la lubricación de tuercas, se procede a reunir la prensaestopas, se traslada el equipo nuevamente al área de <i>cracking</i> , se realizan pruebas y el equipo queda funcionando apropiadamente". (03/01/2016).
	Paso 2: Clasificación de incidentes Personas: 2C = Medio. Ambiental: 2C = Medio. Económica: 2C = Medio.	Matriz RAM Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema Ventanas operativas planta piloto 3 La unidad piloto de <i>cracking</i> catalítico fluidizado (FCC) posee un amplio rango de flexibilidad en la operación Las relaciones catalizador/carga típicas oscilan entre un mínimo de 3 a más de 10 g/g con velocidades espaciales (WHSV) que van desde 20 a 160 h-1.	Esperado: ventanas operativas de la planta piloto. Impacto: el tiempo estimado de parada del equipo es de 16 horas, con un costo de reparación de \$15 USD y efectos menores en la salud, la seguridad y el medioambiente.

Continúa

Fases	Información Recopilada	Resultados Concretos
III. Análisis de problemas	Los catalizadores pueden ser evaluados a temperaturas de reacción que van desde 500 °C hasta 600 °C. La unidad utiliza aproximadamente 2800 g (2.8 kg) de catalizador de <i>cracking</i> . Los flujos de carga de hidrocarburos durante la operación pueden variar desde un mínimo de 350 g/h hasta un máximo de 2.000 g/h.	Esperado: ventanas operativas de la planta piloto. Impacto: el tiempo estimado de parada del equipo es de 16 horas, con un costo de reparación de \$15 USD y efectos menores en la salud, la seguridad y el medioambiente.
	Paso 4: Definición del problema	Localización: <i>chiller</i> del estabilizador de la planta. Tiempo: 1 Fallo (en el tiempo de estudio).
IV. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible Diagrama causa-efecto planta piloto 3 (ver figura 4.20)	Causa posible: Se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT).
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable y raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados con la OT 78927 de mantenimiento, donde se puede corroborar que se requiere una revisión del <i>chiller</i> , debido a que se presenta una mancha de aceite en la válvula de paso y que el equipo se encuentra con presiones bajas.
	Paso 7: Verificación de causas	
V. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Incluir técnicas con una periodicidad menor relacionadas al mantenimiento predictivo.  Se recomienda mantener: Los procesos de mantenimiento preventivo.  Se recomienda evitar: La ocurrencia de una programación tardía del mantenimiento.

A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 3:

Figura 4.20. Diagrama causa-efecto planta piloto 3



A continuación, se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 4 asociado al tipo de fallo instrumental (taponamiento).

Tabla 4.10. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 4, tipo de fallo instrumental (taponamiento)

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	Descripción: "Revisar válvula control LIC300" (28/09/2015). Descripción: "Revisión y calibración de LV-320 bioaceite." (05/10/2015). Descripción: "Reparar <i>backpressure</i> de PCV-301 bioaceite" (14/10/2015).
	Paso 2: Clasificación de incidentes	Matriz RAM  Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 4 Remoción de oxígeno y estabilización de compuestos que polimerizan con el tiempo debido a su grado de reactividad.	Esperado: principal objetivo de la planta piloto. Actual: no se encuentra desempeñando su principal función, debido a su versatilidad está realizando la reducción de acidez de crudos pesados.

Continúa

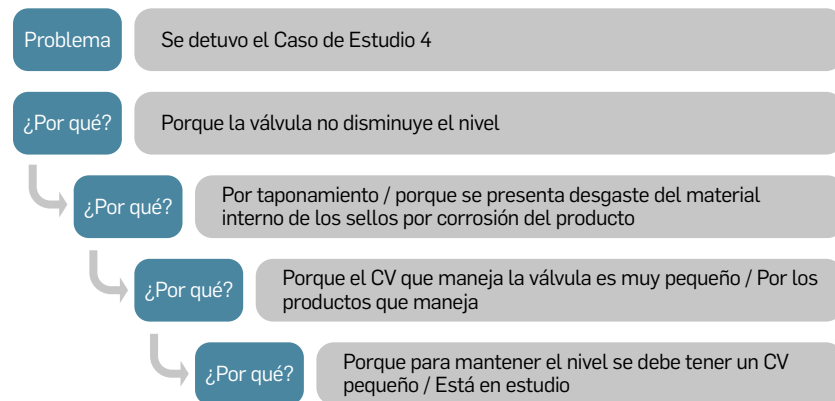
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de problemas	Paso 3: identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 4 Remoción de oxígeno y estabilización de compuestos que polimerizan con el tiempo debido a su grado de reactividad.	Impacto: en caso de no lograr salvar la corrida se pierde una semana de trabajo realizado para activar el catalizador equivalente a 168 horas hombre, y siendo que la hora es aproximadamente COP 213.000, equivale a COP 35.784.000. Si se pierde el catalizador se tiene una pérdida de aproximadamente COP 30.000.000
	Paso 4: Definición del problema	Localización: los principales fallos se presentan en válvulas y medidores de flujo, nivel y presión. Tiempo: 11 fallos (en el 2015). Extensión: si el controlador de flujo másico falla y no se corrige rápidamente, se ocasiona el daño del catalizador. Si se dañan las válvulas puede ocasionar la explosión de tanque por sobrepasar las 100 psi máximas debido a que el proceso de paso se debe realizar manualmente de tanque con presión de 1300 psi.
IV. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama cinco porqués planta piloto 4 (ver figura 4.21) Diagrama causa-efecto planta piloto 4 (ver figura 4.22)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT) y del personal de mantenimiento con relación y conocimiento de la planta.
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable: resultan dos causas como probables las cuales son el estudio de la corrosión de los materiales internos de la válvula y el desfase de calibración de medidor de flujo con cámara húmeda. Los hechos para apoyar las causas propuestas son testimonio del encargado de mantenimiento y visita a campo con ingeniero de la planta piloto.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
V. Análisis de causa raíz	Paso 7: Verificación de causas	Causa raíz: se obtuvieron en total dos causas raíz en planta, la falta de tareas de inspección y dejar que tanto la válvula la como el medidor de flujo lleguen al punto de taparse. Estas están respaldadas en la descripción detallada de la OT y en los testimonios recogidos en campo.
VI. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Una tarea a condición/ reacondicionamiento donde mediante inspección se revise y evalúe que tan taponada o corroída está la válvula y a partir de ahí, decidir si se debe limpiar o en su defecto cambiar la válvula.

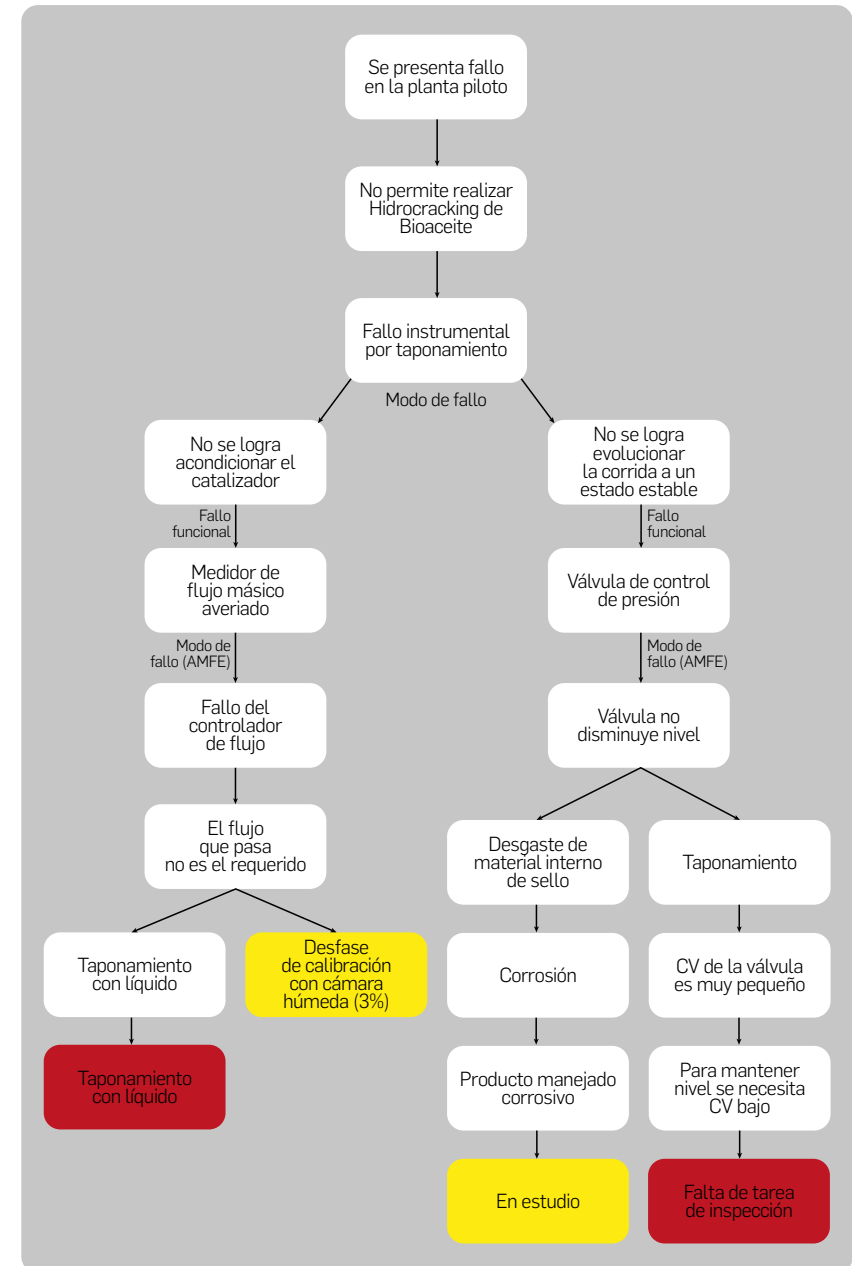
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco por qué(s) para la planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (taponamiento).

Figura 4.21. Diagrama cinco porqués planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (taponamiento)



A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (taponamiento)

Figura 4.22. Diagrama causa-efecto planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (taponamiento)



Ahora se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 4 asociada al tipo de fallo instrumental (deficiencia estructural, tabla 4.11).

Tabla 4.11. Análisis de causa raíz concreto planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural)

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	Descripción: "Cambio del vástago de la válvula de cont." (29/04/2015). Descripción: "Revisión medidor flujo gases bioaceites" (26/08/2015). Descripción: "Revisión del LIC-89300 y posible cambio" (27/08/2015). Descripción: "Revisión baño enfriamiento JULABO U8900" (10/09/2015).
	Paso 2: Clasificación de incidentes  Personas: Medio. Ambiental: Medio. Económica: Medio.	Matriz RAM  Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 4 La planta piloto está diseñada para tomar bioaceite obtenido por pirolisis rápida, y realizar un hidrotatamiento, cuyo principal objetivo es la remoción de oxígeno y estabilización de compuestos que polimerizan con el tiempo debido a su grado de reactividad. El hidrógeno que se alimenta a la planta ingresa en una relación de 0.072 w/w con respecto al bioaceite. La unidad presenta una producción teórica de un 60 % w/w de bioaceite mejorado con respecto al cargado.	Esperado: principal objetivo y ventanas de operación para la planta piloto. Actual: no está desempeñando la función de mejoramiento de bioaceite, sino que, por su versatilidad, está realizando la reducción de acidez de crudos pesados. Impacto: en caso de no lograr salvar la corrida se pierde una semana de trabajo realizado para activar el catalizador equivalente a 168 horas hombre, y siendo que la hora es aproximadamente COP 213.000, equivale a COP 35.784.000. Si se pierde el catalizador se tiene una pérdida de aproximadamente COP 30.000.000

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de problemas	Paso 4: Definición del problema	Localización: los principales fallos se presentan en válvulas y medidores de flujo, nivel y presión. Tiempo: 11 fallos (en el 2015). Extensión: si el controlador de flujo másico falla y no se corrige rápidamente, se ocasiona el daño del catalizador. Si se dañan las válvulas puede ocasionar la explosión de tanque por sobrepasar las 100 psi máximas debido a que el proceso de paso se debe realizar manualmente de tanque con presión de 1300 psi.
IV. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama cinco porqués planta piloto 4. Opción uno (ver figura 4.23) Diagrama 5 porqués planta piloto 4. Opción dos (ver figura 4.24) Diagrama causa-efecto planta piloto 4 (ver figura 4.25)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT) y personal de mantenimiento con relación y conocimiento de la planta.
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable: para este tipo de fallo solo se encuentra una de las causas como descartada. Esta causa es: "Transmisor no indicado para el proceso" por no soportar las condiciones de operación, dado que, según lo reportado por el funcionario de mantenimiento encargado de dicha falla, este transmisor fue reemplazado por otro tipo de transmisor. Los hechos para apoyar las causas propuestas son testimonio del encargado de mantenimiento y visita a campo con ingeniero de la planta piloto.

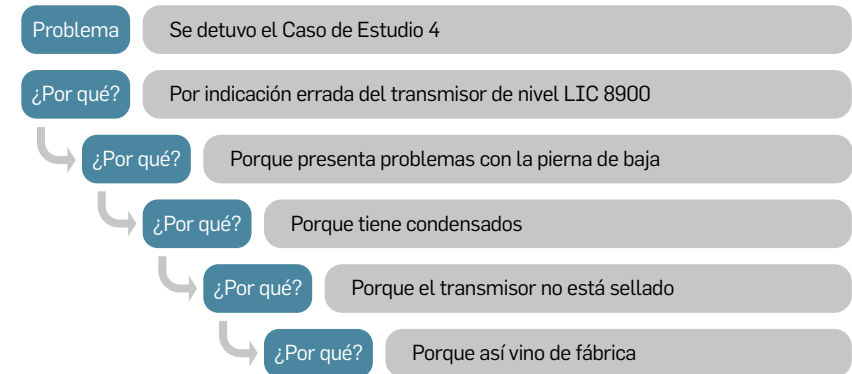
Continúa



Fases	Información recopilada	Resultados concretos
V. Análisis de causa raíz	Paso 7: Verificación de causas	Causa raíz: se obtuvieron en total tres causas raíz en la planta. Dos de estas son la mala selección o la inadecuación de transmisores para el proceso. La primera relacionada con el medidor de nivel y la segunda con el indicador de presión. La última causa raíz es la ausencia de una tarea proactiva de mantenimiento por daño por tiempo de uso del solenoide de válvula <i>on-off</i> . Todas las causas raíz encontradas están fundamentadas en la descripción detallada de las OT y en testimonios de encargados de planta piloto y mantenimiento.
VI. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: La necesidad de sellar o aislar la pierna de baja del medidor de nivel con presión diferencial, o adquirir un transmisor más indicado para el proceso, para de este modo evitar los condensados. En cuanto a los medidores de presión se recomienda cambiar estos por unos cuya ventana operativa sea de 0 a 3000 psi para de esta forma evitar medidas erróneas o imprecisas y que cuyo material sea químicamente compatible con el proceso. El funcionario de la planta piloto recomienda también la disminución de los tiempos de mantenimiento preventivo para de esta forma evitar fallos a causa del deterioro de sellos. Se recomienda evitar: El daño de la válvula <i>on-off</i> por deterioro en su solenoide por fin de su vida útil, se recomienda la implementación de una tarea proactiva de mantenimiento en donde se aumente la frecuencia de cambio de la misma.

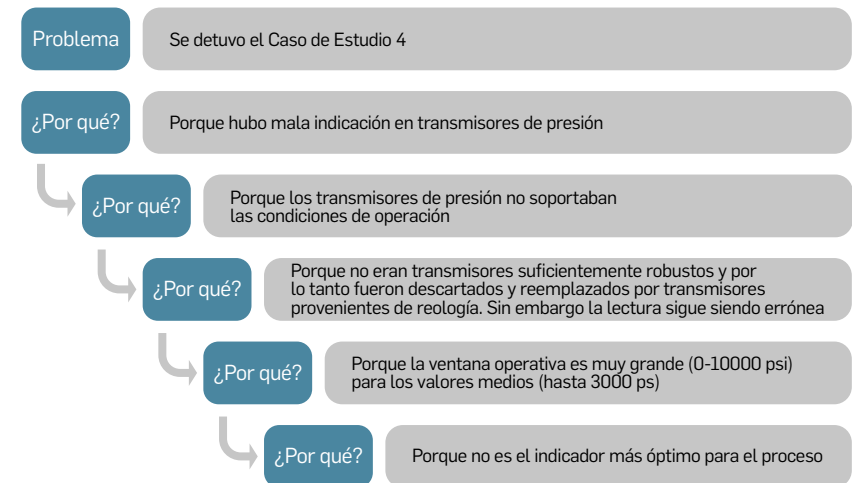
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural).

Figura 4.23. Diagrama cinco porqués planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural)



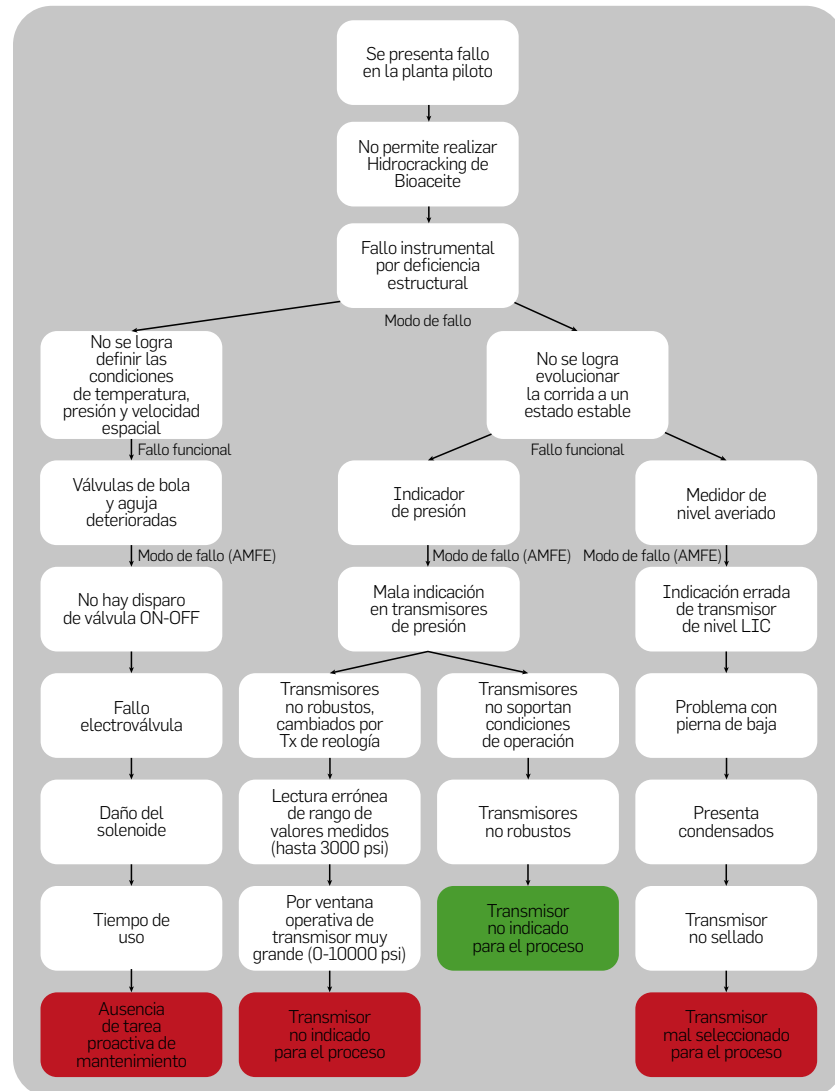
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural).

Figura 4.24. Diagrama cinco porqués planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural). Segunda opción



Seguidamente, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural).

Figura 4.25. Diagrama causa-efecto planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (deficiencia estructural)



A continuación, se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 4 asociada al tipo de fallo instrumental (falla de comunicaciones).

Tabla 4.12. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 4, tipo de fallo: instrumental (falla de comunicaciones)

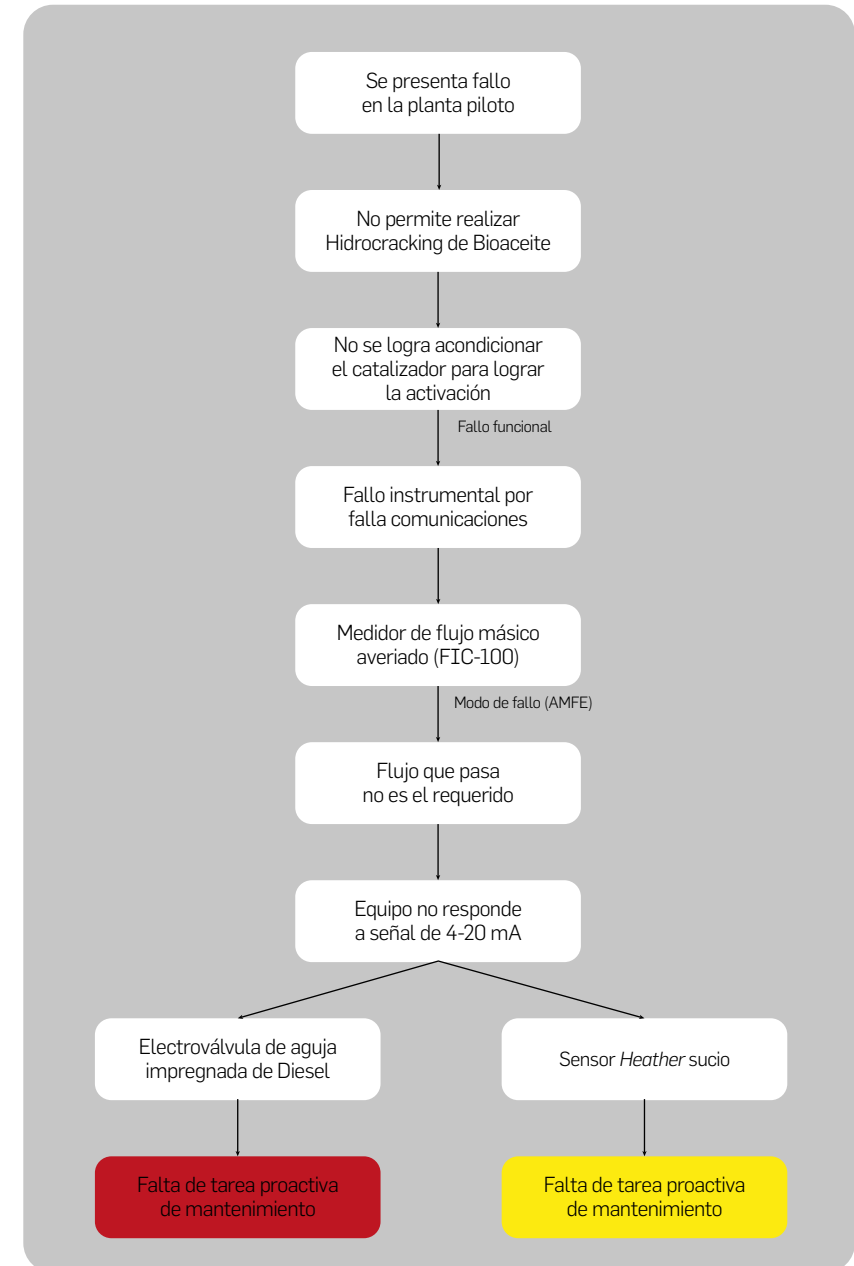
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	Descripción: "Revisión medidor flujo FIC -100 bioaceite" (26/10/2015).
	Paso 2: Clasificación de incidentes Personas: Medio. Ambiental: Medio. Económica: Medio.	Matriz RAM Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 4 La planta piloto está diseñada para tomar bioaceite obtenido por pirólisis rápida, y realizar un hidrotrotamiento, cuyo principal objetivo es la remoción de oxígeno y estabilización de compuestos que polimerizan con el tiempo debido a su grado de reactividad. El hidrógeno que se alimenta a la planta ingresa en una relación de 0.072 w/w con respecto al bioaceite. La unidad presenta una producción teórica de un 60 % w/w de bioaceite mejorado con respecto al cargado.	Esperado: principal objetivo y ventanas de operación para la planta piloto. Actual: no está desempeñando la función de mejoramiento de bioaceite, sino que, por su versatilidad, está realizando la reducción de acidez de crudos pesados. Impacto: en caso de no lograr salvar la corrida se pierde una semana de trabajo realizado para activar el catalizador equivalente a 168 horas hombre, y siendo que la hora es aproximadamente COP 213.000, equivale a COP 35.784.000. Si se pierde el catalizador se tiene una pérdida de aproximadamente COP 30.000.000
II. Análisis de problemas	Paso 4: Definición del problema	Localización: los principales fallos se presentan en los medidores de flujo. Tiempo: 11 fallos (en el 2015). Extensión: si el controlador de flujo másico falla y no se corrige rápidamente, se ocasiona el daño del catalizador. Si se dañan las válvulas puede ocasionar la explosión de tanque por sobrepasar las 100 psi máximas debido a que el proceso de paso se debe realizar manualmente de tanque con presión de 1300 psi.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible Diagrama causa-efecto planta piloto 4 (ver figura 4.26)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT) y personal de mantenimiento con relación y conocimiento de la planta.
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable: para este tipo de fallo solo se encuentra una de las causas como probable. Esta causa es la falta de tarea proactiva de mantenimiento en el sensor <i>heather</i> por suciedad. A pesar de que esta causa se extrajo de la descripción detallada de la OT, se considera como probable dado a que la orden de trabajo muestra que se continuaron las acciones correctivas luego de haber actuado sobre el <i>heather</i> .
	Paso 7: Verificación de causas	Causa raíz: en la metodología se obtuvo una causa raíz relacionada con el problema de comunicación del FIC-100. Esta causa raíz es la falta de tarea proactiva de mantenimiento por electroválvula de aguja impregnada de diésel. Se determina que esta es la causa raíz, dado a que en la descripción detallada de la OT se menciona que luego de ser limpiada esta, se soluciona el problema de comunicación con el controlador. Sin embargo, no se menciona una solución definitiva al problema de la suciedad de la válvula y por lo tanto se considera como causa raíz, dado que si se repite volverá a ocasionar el problema.
IV. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: La implementación de tareas proactivas de mantenimiento y la inclusión de las mismas en el estándar de mantenimiento para de esta forma evitar fallos por suciedad y posterior atascamiento.

A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 4, tipo de fallo instrumental (fallo comunicaciones).

Figura 4.26. Diagrama causa-efecto planta piloto 4, (fallo comunicaciones)



La tabla 4.13 presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 5 asociada al tipo de fallo mecánico

Tabla 4.13. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 5, tipo mecánico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes Cabe resaltar las bombas de vacío como las más frecuentes en el tipo mecánico. Por otro lado, los componentes mencionados en los históricos hacen referencia a las mantas de calentamiento, baños, sensores de nivel y equipos de metrología.	OT. 70441 OT. 70101 OT. 69832 OT. 70972 OT. 71754 OT. 61998 OT. 70098 OT. 71087
	Paso 2: Clasificación de incidentes Calificación en <b>personas</b> de incapacidad temporal (mayor a un día), importante en <b>económico</b> generando gastos entre \$10.000 y \$100.000; y de efecto leve a nivel <b>ambiental</b> .	Matriz RAM  Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 5 Caracterizar, mediante cortes de temperatura, las fracciones de mezclas de hidrocarburos pesados con un punto inicial de ebullición por encima de 150 °C. Producción de fracciones de destilado de calidad estandarizada mediante vacío, de acuerdo a la norma STM D 5236; manteniendo como carga en su proceso hidrocarburos pesados con punto de ebullición inicial superior a 150 °C (300 °F).	Esperado: principal objetivo y ventanas operativas de la planta piloto. Actual: baja eficiencia respecto a la esperada. Impacto: en general una bomba de vacío acata entre dos y cuatro días de mantenimiento correctivo si existe la presencia del <i>kit</i> necesario, si el agitador llega a presentar una falla en la parte magnética puede privar hasta seis meses la producción de la planta, esto es debido a su alta especialización de mantenimiento y poca presencia de componentes dentro del territorio nacional, en caso de falla total la demora aproximada, con base a la experiencia del personal de la unidad, es de dos años.

Continúa

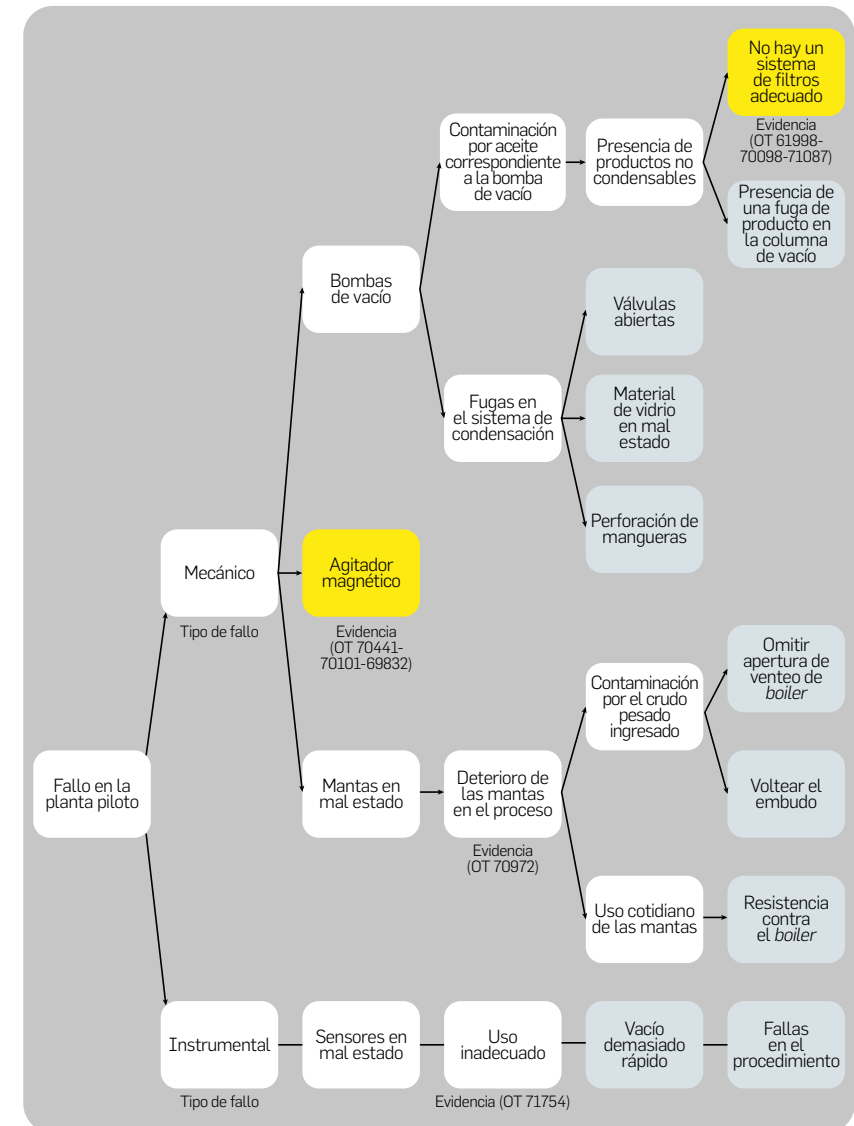
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de problemas	Paso 4: Definición del problema  Localización: por parte del área de calentamiento se identifican fallos en las RTD y mantas de calentamiento. El área de vacío presenta fallos en las líneas de conexión, los equipos y los sensores.	Localización: en general los fallos se pueden dividir en la zona de calentamiento y vacío. Extensión: un fallo en las bombas de vacío, los baños, los condensadores, el agitador o los sensores provoca la detención de la producción.
	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama causa-efecto planta piloto 5 (ver figura 4.27)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT), junto con personal de operación y mantenimiento de la planta.
IV. Análisis de causa raíz	Paso 6: Validación de datos	Causa probable y raíz: la información pudo ser corroborada a partir del personal de mantenimiento de la planta piloto, así como personal operativo de la misma: La mayor parte de las fallas presentes en los históricos de la planta son representadas por el componente bomba (Edwards 35). La contaminación de las <b>mantas de calentamiento</b> puede ser debida al cambio en el diseño del embudo, ya que fue disminuida su longitud por choques internos en el <i>boiler</i> , lo que lleva como consecuencia el derrame de carga sobre la manta inferior del mismo. Por otro lado, la falta de estandarización en el proceso de llenado del <i>boiler</i> da lugar al desbordamiento de la carga, lo que conlleva a la contaminación de las mantas superior e inferior.
	Paso 7: Verificación de causas	Pertenecientes al mismo. El diámetro necesario para el acople del <b>agitador magnético</b> no es el correcto, por lo cual se utiliza silicona de alta temperatura en su acople. Adicionalmente, la unión cardánica presenta temblor al momento de funcionar por el desgaste de uso, lo que puede ocasionar la ocurrencia de fallo total de los rodamientos.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
V. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	<p>Se recomienda lograr: Se recomienda la implementación de un sistema de filtros o trampa de livianos en la bomba de vacío (<b>Edwards 35</b>) con el fin de evitar la contaminación del aceite de la misma, además el estudio de la reducción de impacto de la fuga con la presencia del sistema, y en caso dado evaluar la relación costo beneficio del mantenimiento correctivo de la columna y la contaminación generada.</p> <p>Por parte de las <b>mantas de calentamiento</b> y su deterioro por uso, es recomendable el cambio o mantenimiento correctivo de las mismas actualmente, y su respectiva inclusión en un mantenimiento preventivo frecuente. Al hablar del deterioro por contaminación, se recomienda el acople de un vástago más largo al embudo, ya que este fue cortado y en la actualidad no llega al fondo del <i>boilery</i> presenta derramamiento en la manta inferior. Por otro lado, para actuar sobre la falla de omisión de venteo del <i>boiler</i>, se recomienda un estudio de movimientos que permita actualizar el manual de uso y aportar una manera sencilla del proceso de llenado del producto.</p> <p>Para los fallos en sensores y RTD, se recomienda un estudio de movimientos, pues su falla principal es la generación de vacío demasiado rápido, causando descalibración de los mismos. Aunque se cuente con el sistema del tensiómetro C14 para la revisión de manera análoga, es necesario disminuir las fallas de los componentes digitales a través de la actualización del manual o de la capacitación del personal, con el fin de justificar la presencia de los mismos componentes en la Planta Piloto.</p>

A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 5.

Figura 4.27. Diagrama causa-efecto planta piloto 5



La tabla 4.14 presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 6 asociada al tipo de fallo mecánico.

Tabla 4.14. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 6, tipo mecánico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 52932: Descripción: "Compresor H". OT. 53319: Descripción: "Cambio cheque bomba dosificadora". OT. 66592: Descripción: "Cambio de manguera de entrada y salida tan". OT. 67461: Descripción: "Reparar rosca de controlador de flujo Br". OT. 67766: Descripción: "Reparar secador industrial". OT. 68026: Descripción: "Revisión y diagnóstico bomba de carga Elde". OT. 70092: Descripción: "Revisión bomba dosificadora Eldex". OT. 70375: Descripción: "Reparación baño Julabo F32". OT. 73325: Descripción: "Revisión cambio de empaque HCK". OT. 74074: Descripción: "Revisión válvulas control LIC y PIC".
	Paso 2: Clasificación de incidentes  Personas: 3C = Medio. Ambiental: 3C = Medio. Económica: 1C = Nada.	Matriz RAM  Global: Medio

Continúa

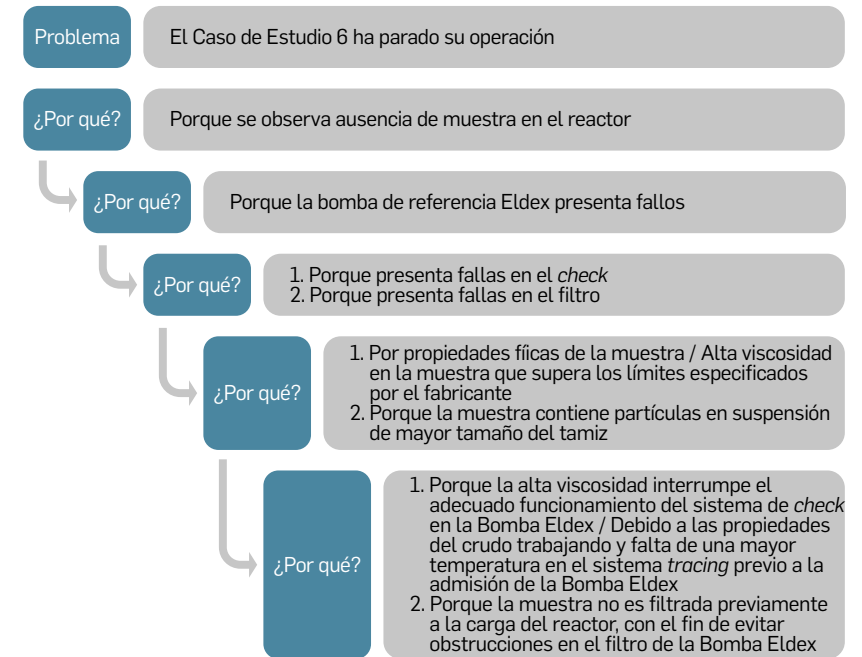
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema  Principal objetivo planta piloto 6 Destilar hidrocarburos comunes (gasóleos), realizando el presionado de hidrogeno a media o alta presión, enviando la carga hacia el reactor constituido por cinco zonas de catalizador a unas presiones que oscilan entre 800 y 2850 PSI, para, posteriormente, realizar la separación gas líquido almacenando el líquido limpio en tanques después de haber sido despojado de H2S y enviando el gas a un sistema de lavado para neutralización de gases según proceso HDT o HCK.	Esperado: principal objetivo y ventanas operativas de la planta piloto. Actual: <i>Standby</i> por falta de solicitud de servicio. Impacto: retrasos en las investigaciones, asistencia técnica y ejecución de proyectos.
	Paso 4: Definición del problema	Localización: bomba Eldex. Tiempo: una semana a seis meses, según sea la disponibilidad de los repuestos en <i>stock</i> y el tiempo de compra. Extensión: interrumpe el proceso petroquímico de hidrocrackeo debido a fallas en la alimentación de muestras al reactor.
III. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama cinco porqués planta piloto 6 (ver figura 4.28) Diagrama causa-efecto planta piloto 6 (ver figura 4.29)	Causa posible: las causas posibles identificadas son las siguientes: Viscosidad: la muestra posee una viscosidad superior a la otorgada por el fabricante, esto impide su correcto funcionamiento produciendo como consecuencias fallas operativas en la bomba. Fallo <i>check</i> : desgaste mecánico de la maquinaria, debido al uso del activo. Alineación de <i>check</i> : el <i>check</i> no está correctamente alineado al momento de su mantenimiento, causando desgaste temprano y falla en los elementos <i>check</i> de la bomba.

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
IV. Análisis de causa raíz	Paso 6: Validación de datos	Causa probable y raíz: las evidencias para validar los datos se basan en entrevistas con el personal operativo: El uso de crudos pesados puede ocasionar mal funcionamiento del dispositivo de bombeo P-82246 al superar las recomendaciones del fabricante de 500 centipoise.
	Paso 7: Verificación de causas	Se evidencia por parte del personal de mantenimiento, desgaste en elemento rotativo <i>check</i> . Oclusión de elemento filtrante debido a materiales sólidos en la muestra. Alta viscosidad en la muestra. Desgaste temprano de elementos rotativos.
V. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Aumentar los tiempos de operatividad de la planta piloto, mejorando la disponibilidad operativa de la Bomba Eldex. Realizar mantenimiento preventivo de los sistemas <i>check</i> de la bomba y verificar la correcta calibración de los mismos, así como su operación en los parámetros especificados por el fabricante. Disponibilidad de elementos <i>check</i> de la bomba Eldex, reduciendo los tiempos de mantenimiento. Se recomienda mantener: Mantenimiento preventivo de la bomba Eldex. Se recomienda evitar: Hacer uso excesivo de la bomba Eldex sin el correcto mantenimiento preventivo de la bomba y los filtros asociados a ella, así como el uso de muestras con alto grado de viscosidad, superando los 500 centipoise especificados por el fabricante.

La figura 4.26 presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 6.

Figura 4.28. Diagrama cinco porqués planta piloto 6



A continuación (página 328), se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 6.

A continuación (página 329), se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 7 asociado al tipo de fallo mecánico.



Figura 4.29. Diagrama causa-efecto planta piloto 6

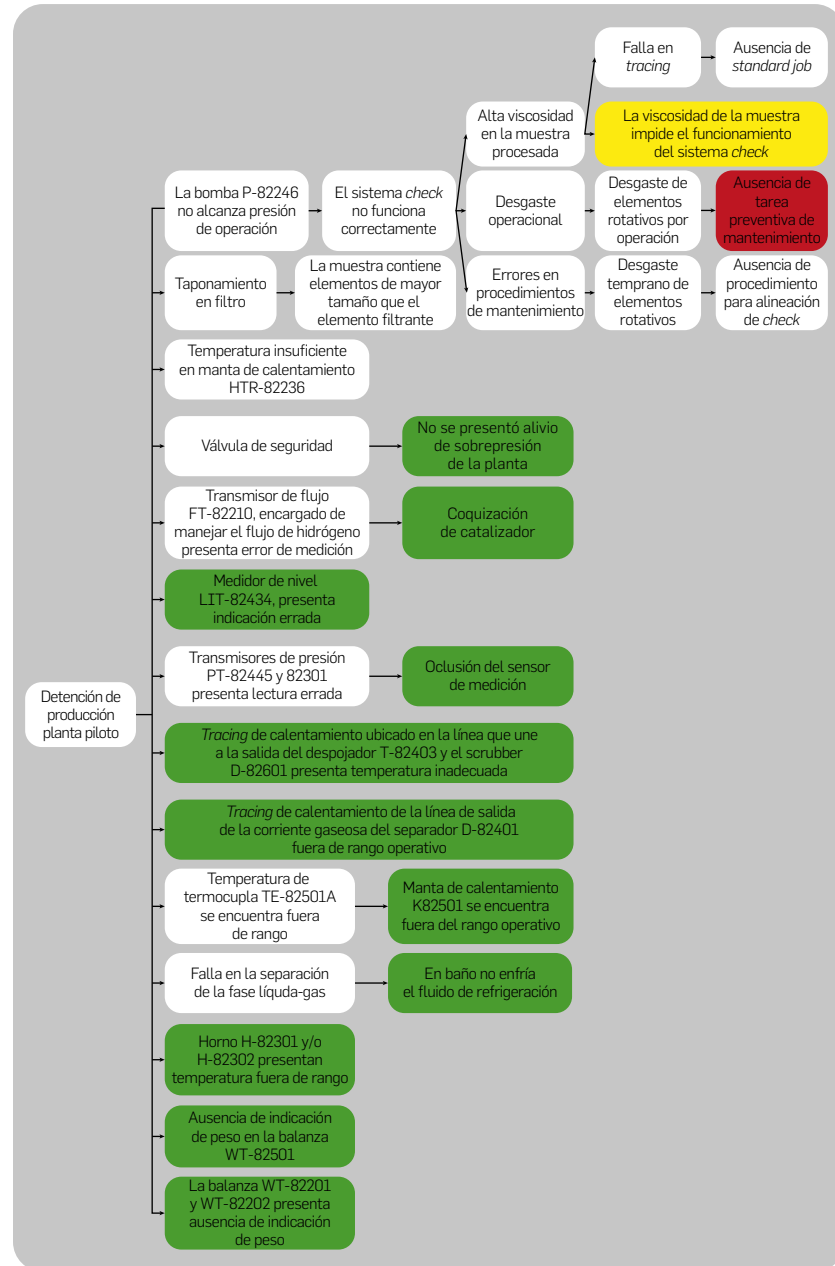


Tabla 4.15. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 7, tipo mecánico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 68819: Descripción: "Correctivo bomba Eldex". (28/04/2014) OT. 73549: Descripción: "revisión controlador de H2". (14/01/2015) OT. 74873: Descripción: "reparación vasos reguladores aire". (06/04/2015) OT. 74894: Descripción: "revisión sensor de gases N6L3M9 PPI". (07/04/2015)
	Paso 2: Clasificación de incidentes	Matriz RAM  Global: Medio
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema	Esperado: principal objetivo y ventanas operativas de la planta piloto. Actual: <i>Standby</i> por falta de solicitud de servicio (en la última corrida, presentó un buen funcionamiento cumpliendo en su totalidad con los requerimientos). Impacto: el tiempo de reparación estimado es de una semana a seis meses, dependiendo de la disponibilidad de los repuestos en <i>stock</i> , labores de mantenimientos y el tiempo de compra si se requiere.
	Paso 4: Definición del problema	Localización: bomba Eldex. Tiempo: presenta una frecuencia de fallo de 71 % en el intervalo de cinco años. Extensión: la falla de la bomba Eldex interrumpe el proceso petroquímico, debido a fallas en la alimentación de muestras al reactor, generando posibles pérdidas en el catalizador, lo que implica la parada inmediata de la planta.

Continúa

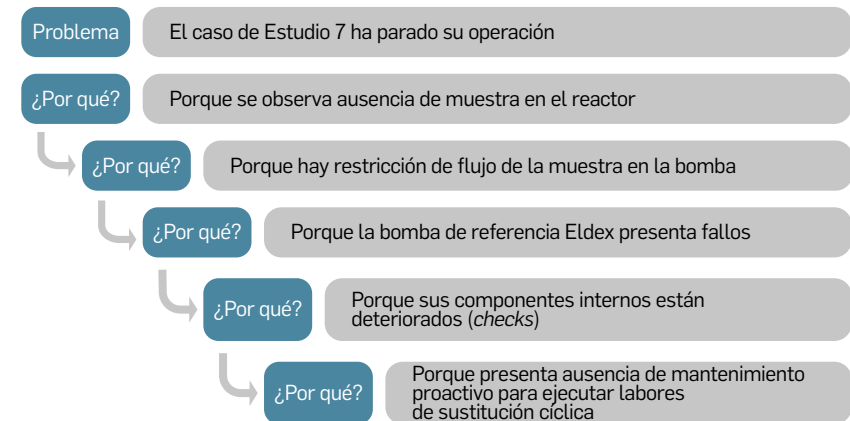
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible  Diagrama cinco porqués planta piloto 7 (ver figura 4.30) Diagrama causa-efecto planta piloto 7 (ver figura 4.31)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT), junto con personal de operación y mantenimiento de la planta.
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable y raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados por órdenes de trabajo, personal de operación y de mantenimiento.
	Paso 7: Verificación de causas	
IV. Desarrollo de la solución	<p>Paso 8: Recomendaciones RCA</p> <p>Por otra parte, se recomienda ejecutar labores de mantenimiento proactivo, como:</p> <p>Realizar el debido protocolo de inspección de la bomba que implica revisar si se encuentra conectada correctamente a la fuente de energía. Asimismo, inspeccionar sus partes mecánicas (motor, sellos, entre otros) y verificar si el motor gira.</p> <p>Inspeccionar el fusible de protección de la bomba antes de empezar una corrida de planta.</p> <p>Si se presenta ausencia de muestra dentro del proceso, puede deberse a que esta no está siendo filtrada, por esta razón es pertinente verificar el estado del filtro y realizar las tareas de mantenimiento pertinentes.</p> <p>Con el fin de detectar fugas antes de iniciar una corrida, se recomienda presurizar la planta y poder revisar si existen o no fugas en tuberías y accesorios.</p>	<p>Se recomienda lograr:</p> <p>Aumentar los tiempos de operación de la planta piloto, optimizando la disponibilidad funcional de la bomba Eldex y sus componentes internos, alcanzando en su totalidad el funcionamiento del equipo.</p> <p>Se recomienda mantener:</p> <p>El sistema de bombeo confiable, para así garantizar la operación de la planta piloto y esta pueda cumplir en su totalidad sus funciones, evitando interrupciones de los servicios requeridos.</p> <p>Se recomienda evitar:</p> <p>El uso inadecuado de la bomba Eldex sin antes realizar o programar el mantenimiento preventivo pertinente para este equipo, asegurando que sus componentes internos como filtros, <i>checks</i>, entre otros se encuentren en buen estado físico y cumpla con las sugerencias del fabricante.</p>

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
V. Desarrollo de la solución	<p>Es necesario verificar la contrapresión de la bomba. Si existe una inferior a 25psi, la bomba crea más presión y evita que las válvulas operen de manera adecuada. (Verificar la presión en el <i>backpressure</i>)</p> <p>Verificar e inspeccionar los indicadores, medidores y controladores de la planta. Es necesario desmontar cada componente electrónico y verificar que los circuitos internos no se encuentren sulfatados, averiados o con soldaduras frías.</p> <p>Realizar la limpieza a la plataforma de carga, verificar el estado de los componentes internos y de las respectivas conexiones.</p> <p>Inspeccionar el baño de enfriamiento y realizar las tareas de mantenimiento pertinentes</p>	

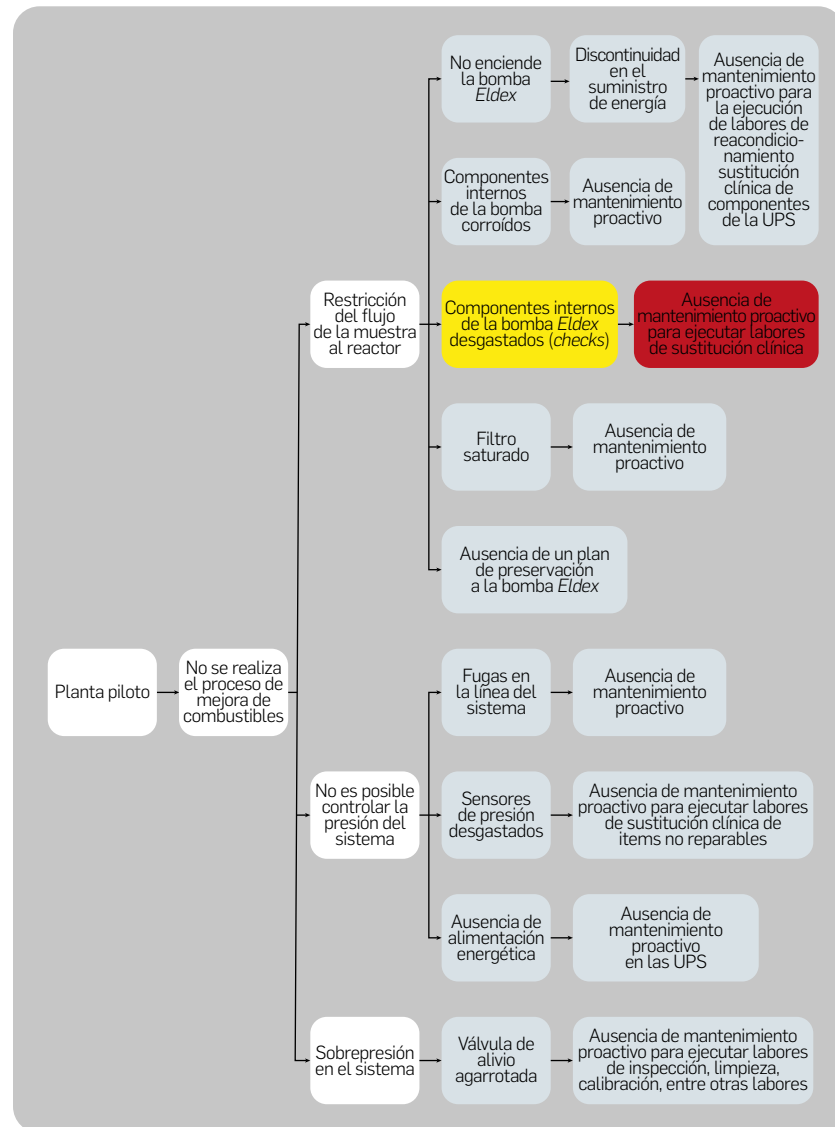
A continuación, se presenta el diagrama de análisis con cinco porqués para la planta piloto 7.

Figura 4.30. Diagrama cinco porqués planta piloto 7



A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 7.

Figura 4.31. Diagrama causa-efecto planta piloto 7



A continuación, se presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 8 asociada al tipo de fallo eléctrico.

Tabla 4.16. Análisis de causa raíz concreta planta piloto 8, tipo de fallo: eléctrico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 76279: Descripción: "reparar manta reactor R-46250 Slurry". (18/08/2015) OT. 77172: Descripción: "Atn emergencia Pta Slurry falla resistencia". (20/08/2015) OT. 77187: Descripción: "Megueo resistencias Slurry". (21/08/2015) OT. 77566: Descripción: "revisión reparación de resistencias U-46". (16/09/2015) OT. 77657: Descripción: "Se requiere cambiar resistencia 46200". (24/09/2015) OT. 77698: Descripción: "se requiere revisar resistencia Slurry". (30/09/2015) OT. 20012160: Descripción: "revisión y diagnóstico horno 46200". (06/07/2016) OT. 20012115: Descripción: "diagnosticar y ajustar sistema protección". (06/07/2016) OT. 20025961: Descripción: "embobinado de motor del agitador". (16/09/2016) OT. 20026464: Descripción: "reparación de motor de 1/4H". (26/09/2016)
	Paso 2: Clasificación de incidentes	Matriz RAM Global: Bajo.
	Personas: OB = Nada. Ambiental: OB = Nada. Económica: 3B = Bajo.	

Continúa

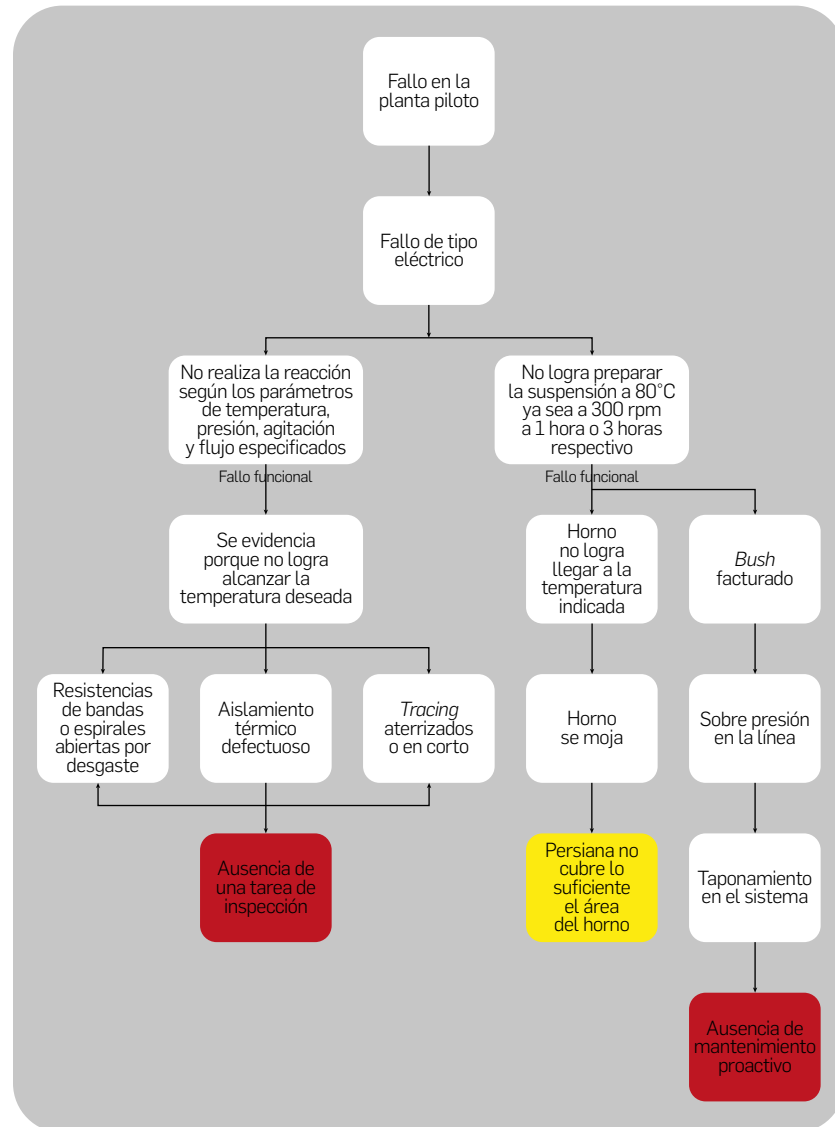
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
II. Análisis de problemas	<p>Paso 3: Identificación del problema</p> <p>Principal objetivo planta piloto 8 Hidrogenólisis de los compuestos sulfurados, nitrogenados, oxigenados y la hidrogenación de olefinas y aromáticos para mejorar la calidad de los crudos pesados, extrapesados, mezclas de crudos pesados y livianos y residuales, que registran una gravedad específica menor a 32 °API y un contenido de destilados recuperados @ 538 °C menor al 80 % del volumen o de sus fracciones.</p>	<p>Esperado: principal objetivo y ventanas operativas de la planta piloto.</p> <p>Actual: se encuentra en condiciones de operación.</p>
	<p>Paso 4: Definición del problema</p>	<p>Localización: a lo largo de todo el proceso que es llevado a cabo en esta planta, desde su etapa inicial hasta antes de obtener los productos de salida.</p> <p>Tiempo: agosto del 2015 hasta septiembre del 2016.</p> <p>Extensión: se han presentado fallos que han generado la detención total de la misma, fallos que se encuentran en las etapas iniciales han provocado la detención de la corrida debido a que en ocasiones no se tiene equipos de respaldo cuando se presentan estos fallos.</p>
III. Análisis de causa raíz	<p>Paso 5: Análisis de causa posible</p> <p>Diagrama causa-efecto planta piloto 8 (ver figura 4.32)</p>	<p>Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT), junto con personal de operación y mantenimiento de la planta.</p>

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
IV. Análisis de causa raíz	<p>Paso 6: Validación de datos</p>	<p>Causa probable y raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados por reuniones con el encargado de la planta piloto y el área de mantenimiento del ICP, en donde se confirmaron los datos recolectados por los históricos de fallos y se corroboró la información, al igual que la información otorgada por los operarios de la planta.</p> <p>Así mismo, se revisaron los procedimientos que son llevados a cabo para el equipo de mantenimiento, como lo son los <i>Standard Job</i> trimestrales y semestrales, en donde se confirmó que acciones son realizadas y los procedimientos que se hacen.</p>
	<p>Paso 7: Verificación de causas</p>	
V. Desarrollo de la solución	<p>Paso 8: Recomendaciones RCA</p>	<p>Se recomienda lograr:</p> <p>Incluir dentro de las rondas de mantenimiento preventivo, acciones proactivas de revisión, inspección y validación del excelente estado de; cada componente de los motores eléctricos y tener catalogados todos los componentes consumibles; las resistencias térmicas y sus correspondientes aislamientos, el cambio de éstos a fallo genera retrasos en las corridas.</p> <p>Diseño e instalación de una persiana idónea para evitar el flujo de agua, para la prevención de humedad en componentes del horno.</p>

A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 8.

Figura 4.32. Diagrama causa-efecto planta piloto 8, tipo de fallo: eléctrico



Finalmente, la tabla 4.17 presenta el análisis de causa raíz para la planta piloto 8 asociada al tipo de fallo mecánico.

Tabla 4.17. Análisis de causa raíz concreto planta piloto 8, tipo de fallo: mecánico

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
I. Registro de incidentes o malos actores	Paso 1: Reporte de incidentes	OT. 75880: Descripción: "reemplazar shear key bomba Isco P-46150". (29/05/2015) OT. 77659: Descripción: "se requiere revisar e instalar la P-110". (24/09/2015) OT. 79081: Descripción: "diagnóstico/ reparación agitador R-46450 Slurry". (19/02/2016) OT. 79332: Descripción: "reparación agitador R-46200 Slurry PP". (14/03/2016)
	Paso 2: Clasificación de incidentes	Matriz RAM Global: Medio. Personas: OB = Nada. Ambiental: OB = Nada. Económica: 3C = Medio.
II. Análisis de problemas	Paso 3: Identificación del problema Principal objetivo planta piloto 8 Hidrogenólisis de los compuestos sulfurados, nitrogenados, oxigenados y la hidrogenación de olefinas y aromáticos para mejorar la calidad de los crudos pesados, extrapesados, mezclas de crudos pesados y livianos y residuales, que registran una gravedad específica menor a 32° API y un contenido de destilados recuperados @ 538 °C menor al 80 % del volumen o de sus fracciones.	Esperado: principal objetivo y ventanas operativas de la planta piloto. Actual: se encuentra en condiciones de operación.

Continúa

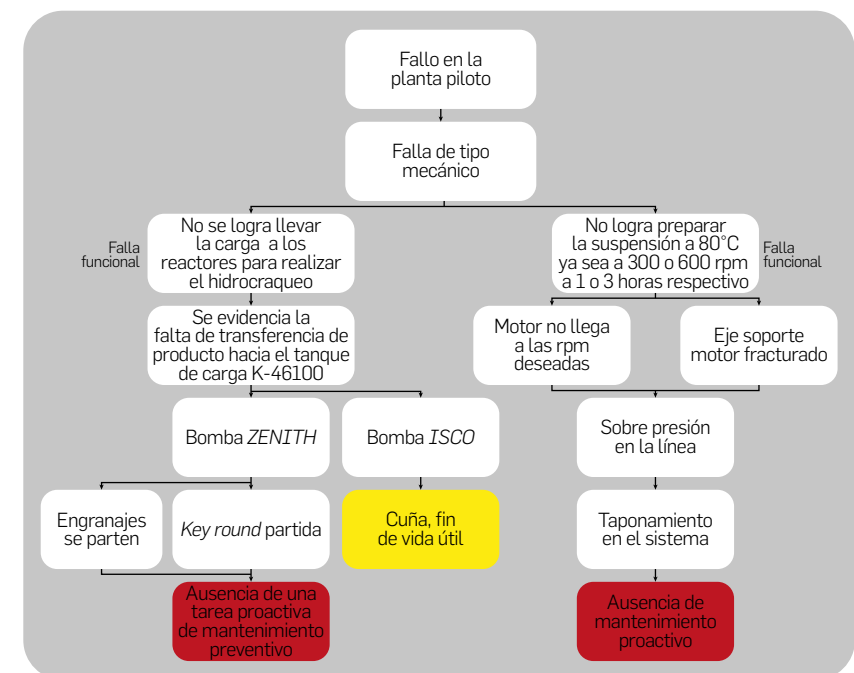
Fases	Información recopilada	Resultados concretos
III. Análisis de problemas	Paso 4: Definición del problema	Localización: a lo largo de todo el proceso que es llevado a cabo en esta planta, desde su etapa inicial hasta antes de obtener los productos de salida. Tiempo: mayo del 2015 hasta marzo del 2016. Extensión: se han presentado fallos que han generado la detención total de la misma, fallos que se encuentran en las etapas iniciales han provocado la detención de la corrida debido a que en ocasiones no se tiene equipos de respaldo cuando se presentan estos fallos.
IV. Análisis de causa raíz	Paso 5: Análisis de causa posible Diagrama causa-efecto planta piloto 8 (ver figura 4.33)	Causa posible: se identifican las causas posibles partiendo de la información en las órdenes de trabajo (OT), junto con personal de operación y mantenimiento de la planta.
	Paso 6: Validación de datos	Causa probable y raíz: los hechos para apoyar la causa propuesta son validados por reuniones con el encargado de la planta piloto y el área de mantenimiento del ICP, en donde se confirmaron los datos recolectados por los históricos de fallos y se corroboró la información, al igual que la información otorgada por los operarios de la planta. Así mismo, se revisaron los procedimientos que son llevados a cabo para el equipo de mantenimiento, como lo son los <i>Standard Job</i> trimestrales y semestrales, en donde se confirmó que acciones son realizadas y los procedimientos que se hacen.
	Paso 7: Verificación de causas	

Continúa

Fases	Información recopilada	Resultados concretos
V. Desarrollo de la solución	Paso 8: Recomendaciones RCA	Se recomienda lograr: Incluir dentro de las rondas de mantenimiento preventivo, acciones proactivas de revisión, inspección y validación del excelente estado de los motores de los agitadores. Reestructurar las rondas de mantenimiento preventivo, en donde se incluya acciones proactivas de revisión de las partes electro-mecánicas de cada una de las bombas.

A continuación, se presenta el diagrama del análisis de causa raíz para la planta piloto 8.

Figura 4.33. Diagrama causa-efecto planta piloto 8, tipo de fallo: mecánico



*Actividad 2.5.*

*Reportar los tipos de fallo priorizados, sus causa raíz y la propuesta de solución para cada uno de ellos*

**Resultados**

Para la clasificación de los tipos de fallo priorizados en los que se llegó a la causa raíz, se utilizaron las definiciones asociadas a causa raíz física, humana y latente presentadas por [34]. A continuación, la tabla 4.16 expone para cada planta piloto la categoría de la causa raíz entre física, humana y latente, determinadas por los diferentes tipos de fallo priorizados.

**Fase III**

*Actividad 3.1.*

*Determinar para cada tipo de fallo priorizado su frecuencia*

**Resultados**

A continuación, se presenta el cálculo de la frecuencia para los tipos de fallo priorizados en las plantas piloto, esto se obtuvo partiendo de la información de históricos de fallo. Es importante resaltar que los históricos disponibles variaban en años de una planta piloto a otro. En la tabla 4.19 (página 347) se presenta la frecuencia en un año para todas las plantas.

*Actividad 3.2.*

*Establecer la severidad de los tipos de fallo priorizados*

**Resultados**

Se calcula la severidad para los tipos de fallo priorizados, por la metodología presentada en el marco teórico. Adicionalmente se recomienda la inclusión de los nuevos tipos de fallo determinados en los ACR. Se Presenta de esta manera, la tabla resumen con los resultados del cálculo de la severidad propuesto para cada tipo de fallo priorizado en las plantas piloto. Ver tabla 4.20 (página 347).

Tabla 4.18. Resumen resultados análisis causa raíz para las ocho plantas piloto

Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-5-547)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	Medio
Planta piloto 1	Mecánico	Sobre presión en el ajuste de la rosca	Latente	Elaborar un procedimiento para la actividad de ajustar la rosca del reactor.	3	La presión del sistema decrece, la muestra no puede ser evaluada adecuadamente corriendo el riesgo que se pierda.	Medio	Medio
Planta piloto 2	Mecánico	Coquización del flujo de la línea	Latente	Realizar un diseño experimental para minimizar la probabilidad de taponamiento en la línea. Y, para disminuir la probabilidad de ocurrencia, elaborar un procedimiento para la actividad de mantenimiento proactivo.	1	Se presenta cavitación en la bomba por restricciones de flujo a la salida de los tanques de carga.	Medio	Medio
Planta piloto 3	Mecánico	Falta de técnicas de mantenimiento predictivo	Latente	Establecimiento de técnicas de mantenimiento predictivo.	1	Se presenta mancha de aceite en la válvula de paso, junto con presiones bajas.	Medio	Medio

Continúa



Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-6-547)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	
Planta piloto4	Instrumental (taponamiento)	Falta tarea de inspección	Latente	Por el taponamiento de la válvula cuyo CV es muy pequeño y no puede ser aumentado, se recomienda una tarea a condición/recondicionamiento para que mediante inspección se revise y evellie qué tan taponada o corroida está la válvula y a partir de ahí, decidir si se debe limpiar o en su defecto cambiar la válvula.	1	Pérdida de la corrida, insumos, catalizador, reactivos	Nada	
	Instrumental (deficiencia estructural)	Transmisor no indicado para el proceso	Latente	Necesidad de sellar o aislar la pierna de baja del medidor de nivel con presión diferencial o adquirir un transmisor más indicado para el proceso, y de este modo evitar los condensados. Para el daño de la válvula <i>on-off</i> por deterioro en su solenoide por fin de su vida útil, se recomienda la implementación de una tarea proactiva de mantenimiento en donde se aumente la frecuencia de cambio de la misma.	1	Liberación de vapor y gases tóxicos	Bajo	

Continúa

Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-6-547)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	
Planta piloto	Instrumental (deficiencia estructural)	Falta de tarea proactiva de mantenimiento	Latente	En cuanto a los medidores de presión, se recomienda cambiar estos por unos cuya ventana operativa sea de 0 a 3000 psi, para de esta forma evitar medidas erróneas o imprecisas y que cuyo material sea químicamente compatible con el proceso. El funcionario de la planta piloto recomienda también la disminución de los tiempos de mantenimiento preventivo, para de esta forma evitar fallos a causa del deterioro de sellos.	1	Liberación de vapor y gases tóxicos	Bajo	
	Instrumental (falta comunicaciones)		Latente	Se recomienda para este tipo de falla la implementación de tareas proactivas de mantenimiento y la inclusión de las mismas en el estándar de mantenimiento para de esta forma evitar fallos por suciedad y posterior atascamiento.	1	Liberación de vapor y gases tóxicos. Explosión de <i>Ritter</i>	Bajo	

Continúa

Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-5/47)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	
Planta piloto5	Mecánico	No hay un sistema de filtros adecuado	Latente	Debería existir un sistema de filtros de livianos para la bomba de vacío, luego de observar repercusión en los históricos.	1	Retrasos en la adquisición de los análisis realizados. La bomba es trasladada a mantenimiento para su respectiva limpieza. La planta piloto queda fuera de funcionamiento en espera del componente.	Medio	
Planta piloto6	Mecánico	Ausencia de tarea preventiva de mantenimiento y <i>Standard</i> para desarrollo de actividades	Latente	Se recomienda crear <i>Standard Job</i> para el mantenimiento de los sistemas <i>check</i> de la bomba Eidex, así como un plan para la alineación de mencionados dispositivos, con el fin de evitar desgaste prematuro.	1	La planta piloto presenta fallas en el sistema <i>check</i> de la bomba, ocasionando la parada de la misma debido a que la presión no es suficiente para llevar la muestra al reactor.	-	
Planta piloto7	Mecánico	Ausencia de mantenimiento proactivo para ejecutar labores de sustitución cíclica	Latente	Establecer planes de conservación a todos sus equipos con alta criticidad en el proceso.	1	Ausencia de muestra al reactor, afectando la función principal de la planta piloto.	Nada	

Continúa

Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-5/47)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	
Planta piloto8	Eléctrico	Ausencia de mantenimiento proactivo	Latente	Incluir dentro de las rondas de mantenimiento preventivo, acciones proactivas de revisión, inspección y validación del excelente estado de cada componente de los motores eléctricos y tener catalogados todos los componentes consumibles.	2	Se evidencia por un sobrecalentamiento o en el cuarto de control un valor elevado de temperatura del sensor que tiene asociado la cinta térmica.	Bajo	
							Se evidencia porque la temperatura que registra no es la esperada.	

Continúa

Planta piloto	Tipo de fallo priorizado	Causa raíz	Tipo de causa raíz	Propuesta de recomendación a causa raíz	Críticidad del tipo de fallo (GAC-5/47)	Efecto del tipo de fallo (AMFE)	Críticidad del efecto del tipo de fallo (RAM)	
							Valoración Total	Medio
Planta piloto 8	Mecánico	Ausencia de una tarea proactiva de mantenimiento	Latente	Incluir dentro de las rondas de mantenimiento preventivo, acciones proactivas de revisión, inspección y validación del excelente estado de los motores de los agitadores. Reestructurar las rondas de mantenimiento preventivo, en donde se incluya acciones proactivas de revisión de las partes electro-mecánicas de cada una de las bombas.	2	Se evidencia la falta de transferencia de producto hacia el tanque de carga K-46100 y un incremento de presión en la línea. Adicionalmente puede presentar fugas o cavitación; desalineación de eje de la bomba. Se evidencia por ruidos extraños en el motor; taponamiento en alguna parte del sistema o que el sistema se sobre presiona a causa de que el catalizador no fluye por la línea. Se evidencia por la falta de transferencia de producto entre la zona de carga y un incremento de presión en la línea de transferencia hacia el reactor.		

Tabla 4.19. Resultados para frecuencia de fallos según el tipo de fallo

Plantas piloto	Tipo de fallo	Frecuencia de fallo (fallos/año)
Planta piloto 1	Mecánico	0,6
Planta piloto 2	Mecánico	1
Planta piloto 3	Mecánico	0,25
Planta piloto 4	Instrumental (taponamiento)	0,6
	Instrumental (deficiencia estructural)	0,8
	Instrumental (falta comunicaciones)	0,2
Planta piloto 5	Mecánico	2,66
Planta piloto 6	Mecánico	2
Planta piloto 7	Mecánico	0,75
Planta piloto 8	Mecánico	2
	Eléctrico	5

Tabla 4.20. Resultados severidad por tipo de fallo para las plantas piloto

Plantas piloto	Tipo de fallo	Análisis consecuencias en salud y seguridad			
		Fuego	Explosión	Toxicidad	MÁX
Planta piloto 1	Mecánico	2	3	2	3
Planta piloto 2	Mecánico	1	1	1	1
Planta piloto 3	Chiller	1	1	1	1
Planta piloto 4	Taponamiento	1	1	1	1
	STD	1	1	1	1
	OTH	1	1	1	1
Planta piloto 5	Mecánico	1	1	1	1
Planta piloto 6	Mecánico	1	1	1	1
Planta piloto 7	Mecánico	1	1	1	1

Continúa

Plantas piloto	Tipo de fallo	Análisis consecuencias en salud y seguridad			
		Fuego	Explosión	Toxicidad	MÁX
Planta piloto 8	Mecánico	1	2	1	2
	Eléctrico	1	2	1	2

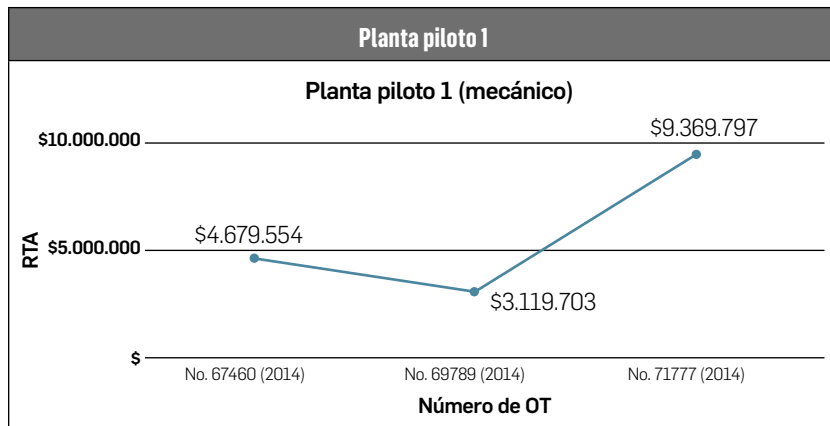
**Actividad 3.3.**

Analizar los costos por incidente de los tipos de fallo priorizados

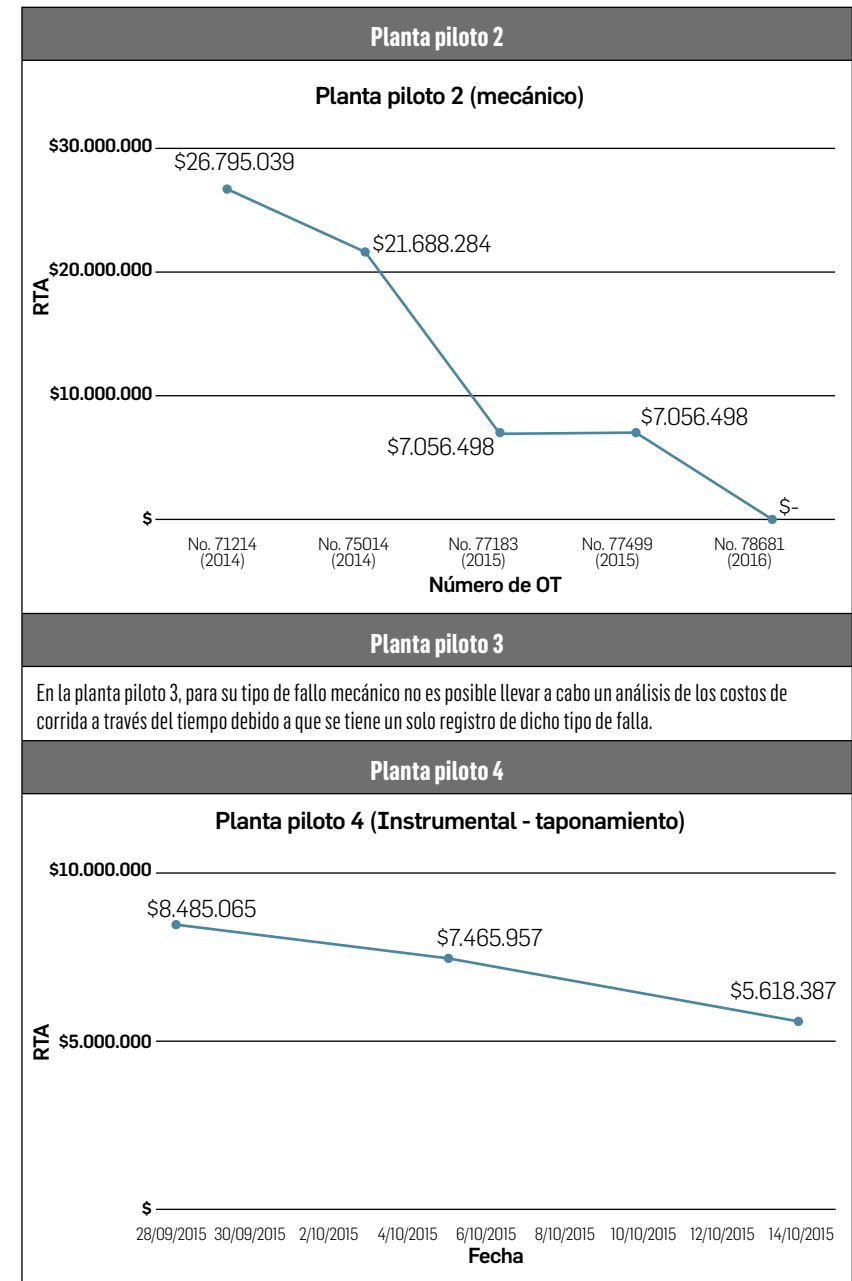
**Resultados**

En el presente numeral se expone una gráfica en línea de tiempo entre el riesgo total anual (RTA) de los incidentes por tipo de fallo priorizado en las plantas piloto. Aplicando a dicho cálculo del riesgo total anual, un ajuste al valor mediante el deflactor para Colombia, llevando los valores a un mismo año con la finalidad de su comparación. A continuación, se presentan las líneas de tiempo para los incidentes según el tipo de fallo priorizado para las plantas piloto.

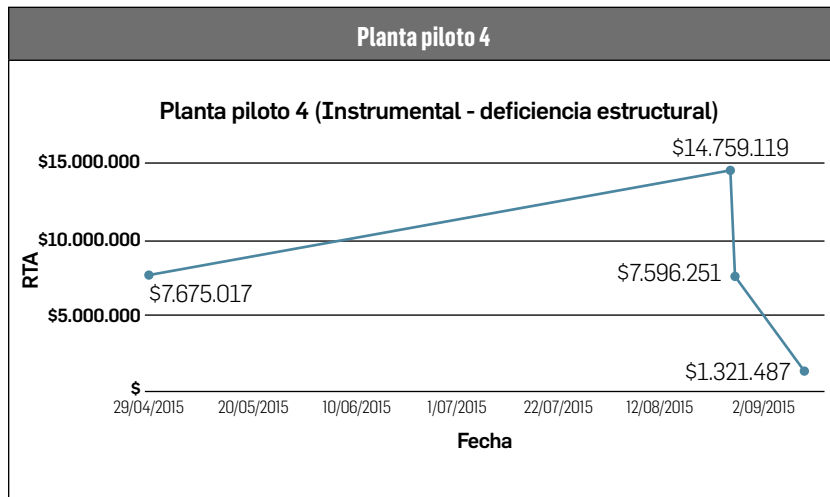
Figura 4.34. Líneas de tiempo para los incidentes según el tipo de fallo priorizado para las plantas piloto



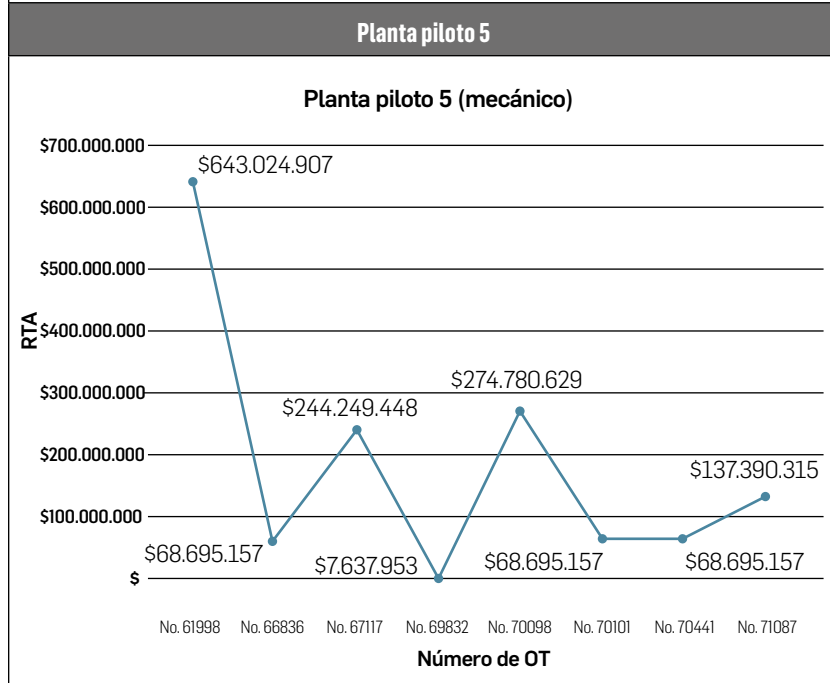
Continúa



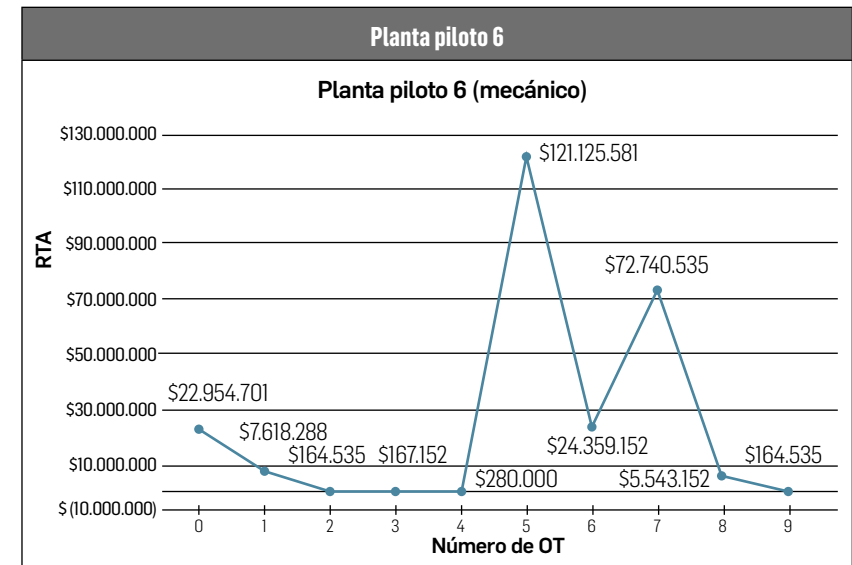
Continúa



En la planta piloto 4, para el tipo de fallo por falla de comunicaciones no se pudo realizar un gráfico de evolución de valores RTA debido a que se contaba con un único registro de este tipo de fallo, arrojando esto un punto en el gráfico.

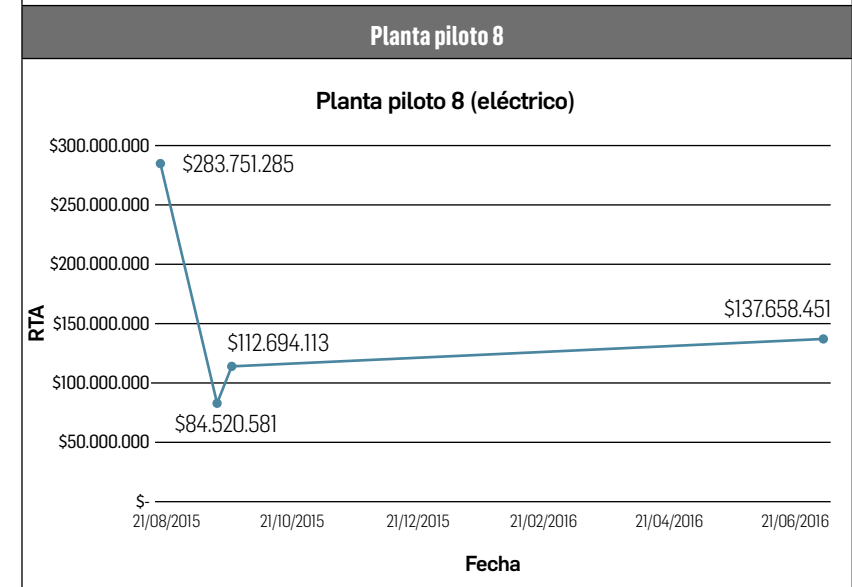


Continúa

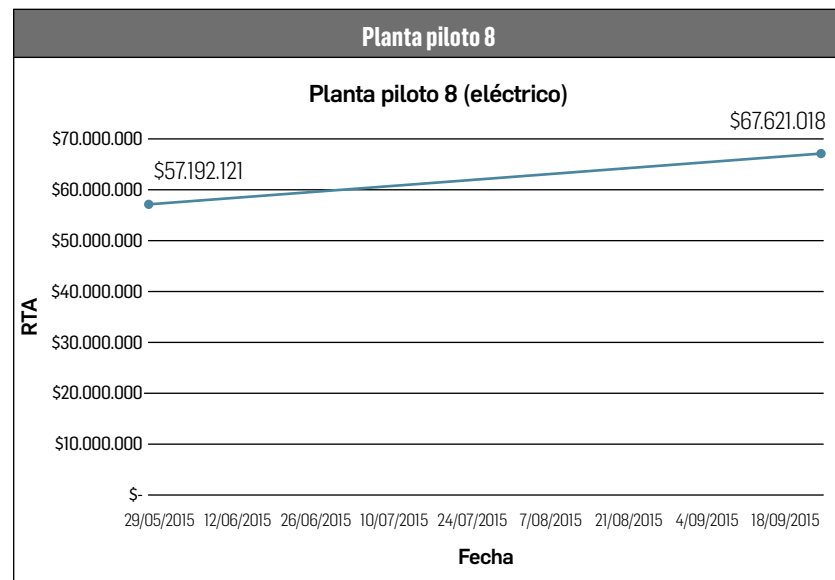


### Planta piloto 7

En la planta piloto 7, su tipo de falla mecánico no es posible llevar a cabo un análisis de los costos de corrida a través del tiempo.



Continúa



*Actividad 3.4.*

*Establecer la criticidad como una medida de riesgo para los efectos de los tipos de fallo priorizados*

**Resultados**

Se realiza una revisión general de los AMFE suministrados por la empresa, para de esta forma proponer opciones de mejora partiendo de la comparación del formato AMFE actual de la empresa con la normativa europea UNE-EN-60812 [36]. Se encontraron oportunidades de mejora, mayoritariamente estructurales y repetitivas. Por lo tanto, se genera el siguiente listado general de oportunidades.

Comparando la estructura en cuanto a columnas entre los AMFE entregados y el formato de una hoja de trabajo dado por la norma, se generan la siguiente tabla de sugerencias.

Tabla 4.21. Resumen general para oportunidades de mejora

Generalidades
El informe podría incluir un resumen y un registro detallado del análisis y los diagramas de bloque o funcionales que definen la estructura del sistema con identificadores numéricos. Así mismo, contener una lista de los diagramas (incluyendo la edición) en los que se basa el AMFE.
Podría prepararse un listado de los efectos de los fallos en un sistema específico resaltados por el AMFE.
El resumen de los efectos de los fallos debería basarse en la lista de efectos finales de fallo y podría contener detalles de los modos de fallo de los elementos que contribuyen a cada efecto de fallo.
Cuando se estima la probabilidad de ocurrencia, el AMFE debe considerar el periodo de tiempo para el que se han hecho las estimaciones. Normalmente es el periodo de garantía o el periodo de vida predeterminado de ese elemento o producto. Es decir, se debe incluir en el análisis el tiempo que lleva en operación el equipo o sobre el cual se calculó la frecuencia de fallo.
Respecto a la cabecera de la hoja de trabajo
Al equipo como tal, planta piloto o subsistema a analizar, se le conoce como elemento final y debe estar identificado y ser consecuente con la terminología usada en el diagrama de bloque, esquemático u otro dibujo utilizado.
Debe incluir nivel de revisión, además de la fecha y nombre del analista que coordina el trabajo del AMFE.
Cabe resaltar que se debe incluir también los nombres de los miembros del equipo que proporciona información adicional, a efectos de control del documento.

Tabla 4.22. Diferencias generales encontradas entre la norma y los AMEF disponibles

	Actual	Observación	
Mantener	"Modo de fallo"	Sin embargo, este debe ser tomado de una referencia o listado con su respectivo código.	
	"Efecto del fallo"	Sin embargo, la columna se puede dividir en "efecto local" y "efecto final".	
	"Frecuencia"	Representando el periodo de tiempo para el que se han hecho las estimaciones.	
Modificar	Actual	Propuesta	Observación
	"Falla funcional"	"Descripción y función del elemento"	Es preferible brindar la función que realiza el elemento y no lo que está dejando de hacer.

Modificar	Actual	Propuesta	Observación
	"Health and safety" y "Environment"	"Categoría de severidad"	Abarca las dos perspectivas actuales, y se recomienda su elaboración por la metodología mostrada en el marco teórico.
Incluir/eliminar	Incluir	Eliminar	Observación
	"Ref. Elemento"		Determinando la referencia del elemento en el diagrama de bloques.
	"Código del modo de fallo"		
	"Posibles causas de fallo"		
	"Método de detección"		
	"Medidas de compensación contra el fallo o redundancia"		
	"Comentarios"		
		"PLE"	Al no encontrarse dentro del formato de la norma, se deja a consideración si se deben eliminar o mantener en el análisis.
		"Criticality Assessment"	
		"Economics"	
		"ETBC"	
		"Repair Cost"	
		"Labour"	
	"Tareas propuestas"	Al no encontrarse incluida en el formato de la normativa, se recomienda ser quitada y mover la información que está allí para hacer parte de la columna de la norma "comentarios"	

## 4.5 Discusión y conclusiones

En este trabajo se parametrizó la severidad de los tipos de fallo priorizados de los activos I+D de la planta piloto seleccionadas, a partir de un diagnóstico preliminar del área de mantenimiento (MES), análisis de causa raíz y análisis de riesgos de operabilidad bajo el análisis de modos, efectos y criticidad de falla – FMECA, bajo las etapas de definir y medir la metodología SIX SIGMA.

### 4.5.1 Discusión y conclusiones para evaluar el desempeño de la gestión del mantenimiento a partir de la auditoría MES (maintenance effectiveness survey) como apoyo a la toma de decisiones en el proceso de gestión del mantenimiento

Los resultados arrojados por la aplicación del instrumento MES, muestra que siete de las ocho plantas piloto en el área *planificación y ejecución* presentan las mayores valoraciones, se resaltan aspectos como la planificación de las actividades de mantenimiento correctivo/preventivo, el control de los tiempos de los procesos y que el mantenimiento es asignado en función de las habilidades de su personal.

Mientras que, cuatro de las ocho plantas piloto en el área *gerencia de la información* presentan las menores valoraciones, resaltan aspectos como la imprecisión de los registros por fallas en sus sistemas, la regular identificación, codificación de cada componente y su asociación a un sistema dentro de toda la planta, y una brecha en la toma de decisiones a partir de los reportes generados por SAP.

Al desarrollar un análisis conjunto para todas las plantas la clasificación de la empresa resultó ser "Muy Buena", sin embargo, fueron planteadas en total 54 acciones de mejora para todas las preguntas cuyos resultados se ubicaron en los niveles de calificación más bajos (mayores brechas), dato que representa el 75 % del total de las preguntas por la encuesta MES.



Las 54 acciones de mejora se fueron distribuidas, de la siguiente forma: 75 %, 81 %, 83 %, 50 %, 81 % y 78 % asociadas a las áreas; *recursos gerenciales, gerencia de la información, equipos y técnicas de mantenimiento preventivo, planificación y ejecución, soporte, calidad y motivación, y aspectos técnicos asociados a la gestión de mantenimiento*, respectivamente.

#### 4.5.2 *Discusión y conclusiones para analizar los eventos de fallo de las plantas piloto, a partir del análisis de causa raíz (ACR), que permita prevenir la frecuencia, minimizar y controlar los efectos de las fallas*

Respecto al análisis de causa raíz, el 47 % de los tipos de fallo priorizados por el RTA hacen referencia al tipo instrumental, otro 47 % mecánico, el 6 % restante eléctrico.

Respecto al paso 2 del análisis de causa raíz: *clasificación de Incidentes*, el 90 % de los **tipos de fallo** presenta un nivel RAM: medio, donde para la consecuencia en la categoría de personas cuatro de ocho plantas piloto fueron valores por "3C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos diez años generando una incapacidad a personas igual o mayor a un día. En la consecuencia para la categoría de ambiente, tres de ocho plantas piloto fueron valores por "3C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años generando un impacto "localizado" al ambiente. Finalmente, en la consecuencia para la categoría de económico, dos de ocho plantas piloto fueron valores por "1C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años generando un impacto económico menor a 10.000 USD.

El 100 % de las causas raíz se categorizó en latentes, haciendo énfasis a la ausencia o mejora de procedimientos institucionales para llevar a cabo las tareas proactivas de mantenimiento e inspección, ofreciendo a la empresa acciones prácticas de mejora en sus procesos.

Un 63 % de los cálculos del riesgo total anual que fue proyectado en el tiempo presentan una tendencia decreciente. Mostrando un impacto positivo por la eficiencia en los procesos de mantenimientos correctivos en los años analizados para cada planta piloto.

#### 4.5.3 *Discusión de los resultados para el análisis de los tipos de fallo priorizados, su severidad y su frecuencia de ocurrencia, a partir de la implementación del análisis de tipos y criticidad de fallo*

La severidad del tipo de fallo se calculó en función de tres escenarios; **fuego** (inflamabilidad, cantidad liberada, exposición y posibilidad para evitar el peligro), **explosión** (posibilidad de nube vapor explosiva, masa del vapor liberado, otras explosiones, exposición y posibilidad para evitar el peligro) y **toxicidad** (toxicidad, concentración, exposición y posibilidad para evitar el peligro).

De las ocho plantas piloto evaluados se resalta que en la planta piloto 1 se presenta un análisis con valoración máxima 3, siendo está la más alta. Esta se debe a que la clasificación matriz de riesgo escenario explosión obtuvo una valoración de 3. Dada por una posibilidad de nube de vapor explosiva de nivel medio: liberación de nube explosiva en un área de congestión media (algunos obstáculos presentes), una masa de vapor liberado (instantánea o por hora) menor a 50 kg, otras explosiones de gas presente y  $50 < p \cdot V < 500 \text{ bar m}^3$ , con una exposición frecuente a continua mayor a seis horas-hombre al día y una posibilidad para evitar el peligro en algunas circunstancias mayor al 25 % de las plantas piloto.

Con respecto a la evaluación de la severidad del efecto del fallo, se resalta que el tipo de fallo explosión, descrito en el párrafo anterior, fue uno de los que presentó mayor valoración con respecto a la severidad de su efecto. Obteniendo una valoración máxima de nivel "medio", con valores por "3C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años generando una incapacidad a personas igual o mayor a un día. En la consecuencia

categoría de ambiente 3 de 8 Plantas Piloto fueron valores por "3C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años generando un impacto "localizado" al ambiente. Finalmente, en la consecuencia categoría de económico 2 de 8 Plantas Piloto fueron valores por "1C" haciendo referencia a que el evento ha ocurrido en la empresa en los últimos 10 años generando un impacto económico menor a 10.000 USD.

Teniendo en cuenta la normativa europea UNE-EN-60812 para el análisis de modos y efectos de fallo (AMFE) respecto al formato con el que la empresa trabaja actualmente, se presentaron una serie de recomendaciones expuestas en la sección resultados.

De acuerdo con el objetivo planteado en la investigación, se concluye que respecto a la severidad del tipo y del efecto del fallo, que de los 10 cálculos RAM de la severidad para los tipos de fallos priorizados el 50 % se encuentra en nivel "medio", el 30 % se encuentra en nivel "bajo" y el 20 % restante se encuentra en nivel "nada", cumpliéndose de esta forma el alcance planificado para la investigación.

Como trabajo futuro se planea analizar las características del servicio de mantenimiento que permitan plantear modelos de optimización basados en criterios de fiabilidad que permitan obtener el recurso humano y material óptimo para el desarrollo de los planes de mantenimiento.

## Referencias

- [1] C. Rivera, «Evolución del mantenimiento,» Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2011.
- [2] Mantenimiento Planificado, «MANTENIMIENTO PREVENTIVO,» MantenimientoPlanificado, Guadalupe.
- [3] P. Brown y M. Sondalini, Asset Maintenance Management. The Path toward Defect Elimination.
- [4] R. K. Mobley, An Introduction to Predictive Maintenance, Second ed., Butterworth-Heinemann, 2002, p. 437.
- [5] S. O. Duffuaa y A. Raouf, Planning and Control of Maintenance Systems, Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [6] L. Fedele, Methodologies and Techniques for Advanced Maintenance, Italy: Springer, 2011.
- [7] D. Kumar, J. Crocker, T. Chitra y H. Saranga, Reliability and Six Sigma, Springer, 2006.
- [8] N. Bhushan y K. Rai, «Strategic Decision Making,» de *Applying the Analytic Hierarchy Process*, Springer, 2004.
- [9] Ecopetrol S. A., «Estados Financieros Separados,» PricewaterhouseCoopers Ltda., Bogotá, 2016.
- [10] C. Altmann, «El Análisis de Causa Raíz, como herramienta en la mejora de la Confiabilidad».
- [11] T. Strawn, "Marshall Institute," [Online]. Available: [http://www.marshallinstitute.com/default.asp?Page=Maintenance\\_Resources&Area=Articles&ARTID=RoleOfMaintInOandG](http://www.marshallinstitute.com/default.asp?Page=Maintenance_Resources&Area=Articles&ARTID=RoleOfMaintInOandG). [Accessed 8 February 2017].
- [12] ARCADIS, "www.ARCADIS.com," 2014. [Online]. Available: <https://www.arcadis.com/media/D/9/1/%7BD91132EF-3481-49FC-904D-82045F6F90AB%7DOil%20and%20Gas%20Operational%20Excellence.pdf>. [Accessed 8 February 2017].
- [13] M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa, A. Raouf, J. Knezevic y D. Ait-Kadi, handbook of maintenance management and engineering, London: Springer, 2009.
- [14] Asociación Colombiana de Ingenieros, Capítulo Cundinamarca, «ACIEM,» 8 Junio 2011. [En línea]. Available: <http://www.aciem.org/home/index.php/19-aciem/comisiones/articulos-tecnicos/129-aciem-presenta-encuesta-del-estado-del-arte-del-mantenimiento-en-colombia-2008>. [Último acceso: 8 February 2017].
- [15] A. C. d. I. ACIEM, «"Diagnóstico del Mantenimiento en Colombia (2015)": Estudio ACIEM Cundinamarca,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.aciem.org/home/index.php/prensa/noticias-aciem/23-aciem/eventos/17244-estudio-aciem-cundinamarca-diagnostico-del-mantenimiento-en-colombia-2015>.
- [16] A. I. Carrascal y V. E. Rueda, «Optimización de la estrategia para el mantenimiento de los equipos de generación de energía eléctrica de la refinería de Cartagena Mediante el uso de herramientas de confiabilidad,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2007.

- [17] G. A. Parrado y H. A. Delgado, «Modelo de gestión de mantenimiento para la planta de inyección de agua Campo Tello, basado en estudios de confiabilidad,» Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2008.
- [18] J. F. Montañez y C. A. Gómez, Implementación de metodología Six Sigma en la mejora de procesos y seguridad en las instalaciones de Schneider Electric de Colombia S.A., 2006.
- [19] UNAM, «Modelo de Dirección para la Aplicación de Six Sigma Capítulo II CAPÍTULO II TEORÍA DE SIX SIGMA».
- [20] S. Manivannan, Introducción a Seis Sigma, 2007.
- [21] D. Kumar, Six Sigmas Las mejores prácticas. Una guía por la excelencia en el proceso de los negocios., Panamericana, 2009.
- [22] Marshal Institute, «"Maintenance Effectiveness».
- [23] C. A. Parra y A. C. Márquez, «Ingeniería de Mantenimiento y Fiabilidad Aplicada en la Gestión de Activos,» INGEMAN, Sevilla, 2012.
- [24] Terotecnic, «MES - Encuesta de Eficiencia de IMantenimiento».
- [25] P. Ruiz L, C. González R y J. Alcalde E, «Análisis de causas raíz. Una herramienta útil para la prevención de errores,» *Revista de Calidad Asistencial*, 2005.
- [26] U.S Department of Energy, «ROOT CAUSE ANALYSIS GUIDANCE DOCUMENT,» *Office of Nuclear Energy, y Office of Nuclear Safety Policy and Standards*, 1992.
- [27] M. Alexander, «Decision-Making Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and JMP® Scripting Language».
- [28] A. Crespo M y C. A. Parra M, Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en la gestión de activos, Sevilla: Ingeman, Asociación para el desarrollo de la ingeniería de mantenimiento., 2012.
- [29] J. J. Rooney y L. N. V. Heuvel, «Root Cause Analysis For Beginners».
- [30] B. G. Vorley, «MINI GUIDE TO ROOT CAUSE ANALYSIS,» *MCQI*.
- [31] R. J. Duphily, «Root Cause Investigation Best Practices Guide,» © The Aerospace Corporation, 2014..
- [32] D. L. Gano, «A Comparison of Common Root Cause Analysis Tools and Methods,» 2011.
- [33] C. Parra y A. Crespo, «Análisis Causa Raíz (RCA: Root Cause Analysis). Técnica de evaluación de fallos. CAPÍTULO VI,» 2015.
- [34] R. J. Latino, K. C. Latino y M. A. Latino, Root Cause Analysis. Improving Performance for Bottom-Line Results, Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [35] J. Santos, G. Reyes, A. Ramos y P. Fernández, «Safety Engineering, Risk Analysis and Asset Integrity,» *Special Achema 2015*, p. 66, 2015.
- [36] Comité Europeo de normalización electrotécnica, «Técnicas de análisis de la fiabilidad de sistemas,» AENOR, Madrid, 2008.
- [37] EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARIZATION, Petroleum, petrochemical and natural gas industries - Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment (ISO 14224:2016), Brussels: BSI Standards Limited 2016, 2016.
- [38] L. G. Dean, «Apollo Root Cause Analysis – A New Way Of Thinking,» 1999.
- [39] ECOPETROL, «Manual para aplicación de la metodología de analisis de causa raíz para la solucion de problemas,» Piedecuesta, 2006.
- [40] ECOPETROL S.A., «Manual para aplicación de la metodología de analisis de causa raiz para la solucion de problemas,» Piedecuesta, 2006.
- [41] A. Creus, Fiabilidad y seguridad. Su aplicación en procesos industriales, 2005.